EINFÜHRUNG IN DIE FARBFERNSEH-SERVICETECHNIK

BAND I

GRUNDLAGEN DER FARBFERNSEH-TECHNIK

EINFÜHRUNG IN DIE FARBFERNSEH-SERVICETECHNIK

EINFÜHRUNG IN DIE FARBFERNSEH-SERVICETECHNIK

erscheint in zwei Bänden:

Band I: GRUNDLAGEN DER FARBFERNSEH-TECHNIK

Band II: SCHALTUNGSTECHNIK UND SERVICE-EINSTELLUNGEN

EINFÜHRUNG IN DIE FARBFERNSEH-SERVICETECHNIK

BAND I

GRUNDLAGEN DER FARBFERNSEH-TECHNIK

Ing. W. HARTWICH

1964

PHILIPS TECHNISCHE BIBLIOTHEK

Dieses Buch erscheint in der Philips Technischen Bibliothek auch in englischer und französischer Sprache

Es enthält 218 Seiten, 151 einfarbige, 13 mehrfarbige Abbildungen und eine ganzseitige Abbildung des Farbendreiecks

DK 621.397.132.004.5

© N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken, Eindhoven, Niederlande 1964
Alle Rechte vorbehalten

Wir übernehmen keine Gewähr, daß die in diesem Buch enthaltenen Angaben frei von Patentrechten sind; durch diese Veröffentlichung wird weder stillschweigend, noch sonstwie eine Lizenz auf etwa bestehende Patente gewährt.

VORWORT

Um die sehr umfangreiche und schwierige Materie der Farbfernsehtechnik sinnvoll unterteilen zu können, und so beim Leser stufenweise das Verständnis für moderne Farbfernsehempfängerschaltungen zu wecken, wurde dieses Buch in 2 Bände aufgeteilt und zwar:

Band I: Grundlagen der Farbfernseh-Technik.
Band II: Schaltungstechnik und Service-Einstellungen.

Band II wird voraussichtlich Ende 1964/Anfang 1965 erscheinen.

Im vorliegenden Band I werden die Grundlagen der Farbfernsehtechnik so weit beschrieben, wie es für das spätere Verständnis der Empfängerschaltung notwendig ist. In der ersten Hälfte wird neben der Dreifarbentheorie die senderseitige Übertragungstechnik von der Aufnahmekamera bis zum kompletten Sendersignal behandelt, während in der zweiten Hälfte in umgekehrter Reihenfolge die Rückgewinnung und Wiedergabe der Farbinformation im Empfänger erklärt wird. In Band II wird dann, aufbauend auf diesen Grundlagen, eine komplette moderne Farbfernsehempfängerschaltung mit allen Service-Einstellungen und Abgleicharbeiten ausführlich erläutert.

Als Vorkenntnisse setzt dieses Buch voraus, daß man sich bereits mit der Schwarz/Weiß-Fernsehtechnik vertraut gemacht hat. Es wendet sich also an alle Fernsehtechniker, die mit den Farbfernsehempfängern in Berührung kommen, insbesondere an die große Gruppe der Service-Techniker, die Farbfernsehempfänger warten und instandhalten müssen.

Obgleich es z.Zt. in Europa noch keine verbindliche Farbfernsehnorm gibt und man den allgemeinen Einführungstermin von Farbfernsehsendungen nicht genau voraussagen kann, glaubt der Verfasser doch, daß es bereits an der Zeit ist, sich mit den Grundlagen der recht komplizierten und umfangreichen Farbfernsehtechnik vertraut zu machen.

Die Länder, die bereits Farbfernsehsendungen regelmäßig oder für Versuchszwecke ausstrahlen, benutzen, teilweise geringfügig abgewandelt, die amerikanische NTSC-Farbfernsehnorm. Auch für die europäischen Länder wird bei der Wahl der Farbfernsehnorm auf CCIR-Ebene die amerikanische NTSC-Farbfernsehnorm die Basis bilden, so daß alle

wesentlichen Grundlagen der Farbfernsehtechnik durch die bereits bestehende amerikanische Norm definiert sind. Es kann deshalb im Rahmen dieses Buches die amerikanische Norm als Basis zur Erklärung der verschiedenen neuen Übertragungs- und Wiedergabetechniken benutzt werden.

Das Farbfernsehen in seinem ganzen Umfang setzt ganz allgemein eine recht komplizierte Technik sowohl auf der Sender- als auch auf der Empfängerseite voraus. Erschwerend kommt für den Service-Techniker, auch wenn er sich später nur mit dem Farbfernsehempfänger beschäftigt, hinzu, daß er sich im Gegensatz zum Schwarz/Weiß-Fernsehen viel intensiver mit der Übertragungstechnik des Senders beschäftigen muß, um die Zusammenhänge auf der Empfängerseite besser verstehen zu können.

Will man in kurzen Worten den Umfang der Farbfernsehtechnik beschreiben, so kann man sagen, daß sich das Fernsehen von der „eindimensionalen" Schwarz/Weiß-Technik zur „dreidimensionalen" Farbfernsehtechnik entwickelt hat.

Diese „dreidimensionale" Technik beginnt mit den drei Primärfarben im Farbdreieck, den Begriffen Farbton, Sättigung und Leuchtdichte, und zieht sich über die Zweiphasenmodulation und die Verkopplung des Farbträgers beim Sender bis zum Synchrongleichrichter und der Dreifarben-Bildröhre im Empfänger hin.

Da die beim Farbfernsehen zur Anwendung kommenden neuen Techniken, sowohl auf der Sender- als auch der Empfängerseite, eng miteinander verflochten sind, müssen zwangsläufig bei der Erklärung bestimmter Vorgänge in den ersten Kapiteln einzelne Fragen offenbleiben, die erst in den späteren Kapiteln ihre Klärung finden. Durch diese sehr enge Verflechtung aller Vorgänge sieht man sich zunächst einem geschlossenen Kreis gegenüber, der zwar an beliebiger Stelle aufgetrennt werden kann, jedoch die Kenntnis aller Teilvorgänge voraussetzt, um aus Anfang und Ende wieder einen in sich geschlossenen Zyklus herstellen zu können. Man sollte sich deshalb nicht scheuen, bis zum vollen Verständnis aller Vorgänge dieses Buch zwei- oder dreimal durchzuarbeiten.

Hinweise und Ergänzungen, die bei einer evtl. Neuauflage berücksichtigt werden könnten, nimmt der Verfasser über den Verleger mit Dank entgegen.

Hamburg, April 1964 Ing. W. HARTWICH

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort V

Kapitel I FARBE UND FARBWAHRNEHMUNG

Übersicht 1
I. 1. Das natürliche Licht 1
I. 2. Farbempfindungen im Auge 3
I. 3. Dreifarben-Theorie 6
I. 4. Darstellung der Primärfarben im Farbdreieck . . . 10
I. 5. Farbton, Sättigung und Leuchtdichte 17
Zusammenfassung 20

Kapitel II KOMPATIBILITÄT
VERTRÄGLICHKEIT DER FARB- MIT DER SCHWARZ/WEISS-FERNSEHNORM

Übersicht 22
II. 1. Grundsätzliche Möglichkeit einer Farbfernsehübertragung 23
II. 2. Farbfernsehübertragung ohne Störung des Schwarz/Weiß-Empfanges 27
II. 3. Forderungen für eine Farbfernsehnorm 29
Zusammenfassung 32

Kapitel III LEUCHTDICHTE- UND FARBARTSIGNAL

Übersicht 34
III. 1. Leuchtdichtesignal als Modulation des Bildträgers . . 35
III. 2. Farbdifferenzsignale 39
III. 3. I- und Q-Signale 50
Zusammenfassung 57

Kapitel IV FARBTRÄGER

Übersicht 59
IV. 1. Frequenzwahl des Farbträgers 60
IV. 2. Verkopplung des Farbträgers mit dem Bildträger . . 64
Zusammenfassung 68

Kapitel V MODULATIONSTECHNIK DES FARBTRÄGERS

Übersicht 70
V. 1. Grundlagen der Amplitudenmodulation 71
V. 2. Modulation mit unterdrücktem Träger 79
V. 3. Zweiphasenmodulation 85
Zusammenfassung 87

Kapitel VI KOMPLETTES SENDERSIGNAL

Übersicht 89
VI. 1. Ergänzungen zum Schwarz/Weiß-Signal 89
VI. 2. Signalwerte von der Kamera bis zur Bildträgerspannung 94
Zusammenfassung 96
Anhang 96

Kapitel VII BLOCKSCHALTBILD EINES FARBFERNSEH-EMPFÄNGERS

Übersicht 100
VII. 1. Vergleich zwischen einem Schwarz/Weiß- und Farbempfänger 100
VII. 2. Funktionen der speziellen Farbstufen 104
Zusammenfassung 110

Kapitel VIII DIE FARBFERNSEH-BILDRÖHRE

Übersicht 111
VIII. 1. Verschiedene Bildröhrenarten 112
VIII. 2. Aufbau der Lochmaskenröhre 119
VIII. 3. Einstellung an der Lochmaskenröhre 123
VIII. 4. Statische Konvergenz 127
VIII. 5. Dynamische Konvergenz 131
Zusammenfassung 145
Anhang 146

Kapitel IX DER SYNCHRONGLEICHRICHTER

Übersicht 153
IX. 1. Gleichrichtung eines AM-Signals mit unterdrücktem Träger 153
IX. 2. Synchrongleichrichtung durch Mischschaltungen . . 159
IX. 3. Einfluß der Phasenlage des wiedereingeführten Trägers 162
Zusammenfassung 173

Kapitel X MATRIXSCHALTUNGEN

Übersicht 175
X. 1. Matrix für Farbdifferenz-Gleichrichtung 175
X. 2. Matrix für *I*- und *Q*-Signalgleichrichtung 179
X. 3. Verkettung zwischen Matrix und Synchrongleichrichtung 181
Zusammenfassung 183

Kapitel XI WIEDEREINFÜHRUNG DES FARBTRÄGERS UND SEINE SYNCHRONISIERUNG

Übersicht 185
XI. 1. Quarzoszillator und Reaktanzröhre 185
XI. 2. Phasensynchronisierung des Oszillators 191
Zusammenfassung 196

Kapitel XII FARBBALKENSPANNUNGEN FÜR TEST- UND EINSTELLZWECKE

Übersicht 197
XII. 1. Farbbalken als Primär- und Komplementärfarben . . 197
XII. 2. Farbbalken als Farbdifferenzspannungen 200
Zusammenfassung 214

Literaturverzeichnis 215

Stichwortverzeichnis 217

KAPITEL I

FARBE UND FARBWAHRNEHMUNG

Übersicht

Es wird zunächst das Wesen der Farbe und die Farbwahrnehmung durch das menschliche Auge erklärt. Hierbei wird die spektrale Zusammensetzung des Sonnenlichtes und die Methode der additiven Farbmischung erläutert. Über die Intensitätsempfindlichkeit und das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges erhält man die Grundlage für die Dreifarben-Theorie. Nach der internationalen Festlegung sogenannter Eichreize kommt man zur Darstellung des Normal-Farbdreiecks. In rechtwinkligen Koordinaten abgebildet, ergibt sich die gebräuchlichste Form des Farbdreiecks mit dem Spektralfarbenzug und der Purpurgerade. Durch geeignete Wahl von drei Primärfarben kann man durch dreidimensionales Zusammensetzen fast alle in der Natur vorkommenden Farben reproduzieren. Die räumliche Darstellung des Farbdreiecks führt dabei zur Bildung der Begriffe: Farbton, Sättigung und Leuchtdichte.

I. 1. Das natürliche Licht

Will man das Wesen der Farbe kennenlernen, so muß man sich zunächst mit dem Sonnenlicht beschäftigen, das die Grundlage unserer optischen Wahrnehmungen darstellt. Bekannt ist, daß das von der Sonne zu uns kommende „weiße" Licht eine elektromagnetische Strahlung ist. Untersucht man dieses Licht, so stellt man fest, daß diese Strahlung nicht aus einer einzigen Wellenlänge besteht, sondern ein ganzes Frequenzband umfaßt. Dieses Frequenzband erstreckt sich von etwa 3,8 bis $7{,}9 \cdot 10^{14}$ Hz. Die Grenzen des sichtbaren Lichtbereiches sind dabei nicht exakt zu definieren, da sowohl das menschliche Auge in den beiden Grenzbereichen relative Unterschiede nur noch sehr schwach wahrnimmt, als auch die Empfindlichkeit der menschlichen Augen untereinander stärkeren Unterschieden unterworfen ist. Vergleicht man das Licht als elektromagnetische Strahlung mit anderen Strahlungsarten, so sieht man, daß z.B. in dem Frequenzbereich von etwa 10^5 Hz für unseren AM-Rundfunk bis zu 10^{25} Hz der kosmischen Strahlen nur ein sehr schmaler Ausschnitt vom für uns sichtbaren Licht umfaßt wird. In Abb. I. 1. 1. ist dies dargestellt.

Da das sichtbare Licht aus einem ganzen Frequenzband besteht, wird man sofort vermuten, daß es verschiedene Einzelkomponenten geben muß. Dies läßt sich dadurch nachweisen, daß man das Sonnenlicht z.B. durch ein Kristallgitter oder Prisma schickt. Im Kristallgitter bzw. Prisma

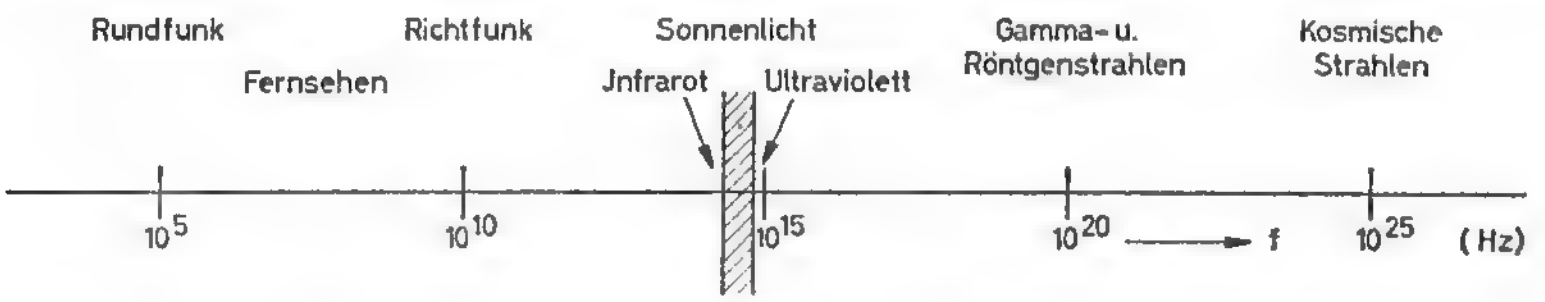


Abb. I. 1. 1. Bereich des Sonnenlichtes in der elektromagnetischen Strahlung.

erfolgt eine Beugung, die von der Wellenlänge des Lichtes abhängig ist, so daß die im Sonnenlicht vorhandenen verschiedenen Teilkomponenten auch verschiedene Brechungswinkel aufweisen. Es findet die allgemein bekannte Aufspaltung des Sonnenlichtes in die verschiedenen Regenbogenfarben statt.

Aus Abb. I. 1. 2. (S. 7) ist zu ersehen, daß das Sonnenlicht sich in die Farben Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau und Violett aufspaltet. Jede Teilkomponente, die sich durch einen ganz bestimmten Farbton auszeichnet, hat eine ihr zugehörige Wellenlänge. Man spricht in diesem Fall von den sogenannten Spektralfarben.

In einer Frequenzskala aufgetragen, ergibt sich für unser Sonnenlicht die Aufteilung nach Abb. I. 1. 3.

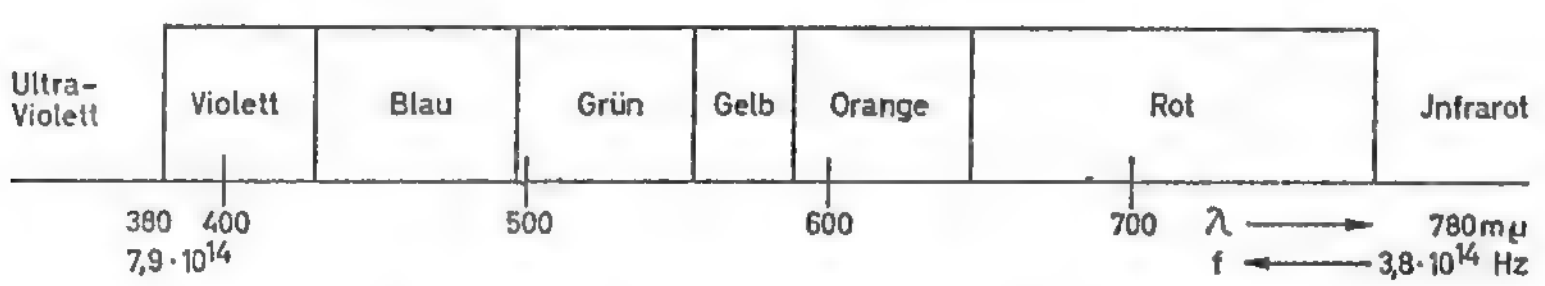


Abb. I. 1. 3. Spektrum des Sonnenlichtes.

Von $3{,}8 \cdot 10^{14}$ Hz, dem roten Farbton, bis $7{,}9 \cdot 10^{14}$ Hz, dem Violett, erstrecken sich die Spektralfarben des Sonnenlichtes. Unterhalb $3{,}8 \cdot 10^{14}$ Hz liegt das Gebiet der infraroten Strahlung und oberhalb $7{,}9 \cdot 10^{14}$ Hz beginnt die ultraviolette Strahlung. An beiden Grenzen endet der Sichtbarkeitsbereich für unser menschliches Auge. Sehr häufig wird zur Kennzeichnung der Spektralfarben nicht die dazugehörige Frequenz, sondern die entsprechende Wellenlänge angegeben. Der Spektralbereich des Sonnenlichtes läuft dann vom Rot mit 780 mμ bis zum Violett mit 380 mμ. Statt

der Bezeichnung milli-mikrometer (10^{-9} m) wird mitunter auch nanometer (nm) oder aber die Einheit Ängström mit der Größenordnung 10^{-10} m benutzt.

Als erste wichtige Tatsache haben wir festgestellt, daß das unserem Auge als „Weiß" erscheinende Sonnenlicht nicht eine einheitliche Strahlung ist, sondern sich aus einem Bündel von Spektralfarben zusammensetzt. Man muß deshalb auch umgekehrt aus verschiedenen Einzelfarben bei geeigneter Wahl weißes Licht darstellen können. Ein einfacher Versuch macht dies deutlich, wenn z.B. die durch eine Prismabrechung entstandenen Regenbogenfarben in umgekehrter Weise wiederum durch ein Prisma geführt werden. Es entsteht dann nach dieser Prismabrechung aus den Regenbogen- oder Spektralfarben wieder das ursprüngliche weiße Licht. Dies ist in Abb. I 1. 4. (S. 7) angedeutet.

Man kann also aus verschiedenen Einzelfarbkomponenten weißes Licht ermischen. Untersucht man diese Möglichkeiten der Farbmischung, so stellt man fest, daß sich weißes Licht nicht nur aus der Summe der bereits kennengelernten Regenbogenfarben, sondern auch aus sehr vielen anderen Farbkombinationen ermischen läßt. Erfolgt diese Mischung, wie beim Farbfernsehen durch die Überlagerung von Leuchtquellen, so spricht man von additiver Farbmischung im Gegensatz zu der subtraktiven Mischung, die z.B. bei der Herstellung von Malfarben maßgebend ist.

I. 2. Farbempfindungen im Auge

Nachdem wir das Licht als elektromagnetische Strahlung eines bestimmten Frequenzbandes kennengelernt haben, müssen wir uns jetzt zunächst mit dem menschlichen Auge beschäftigen, um zu sehen, wie die verschiedenen Farbempfindungen hervorgerufen werden. Bekannt ist der allgemeine Aufbau des Auges, wie in Abb. I. 2. 1. dargestellt.

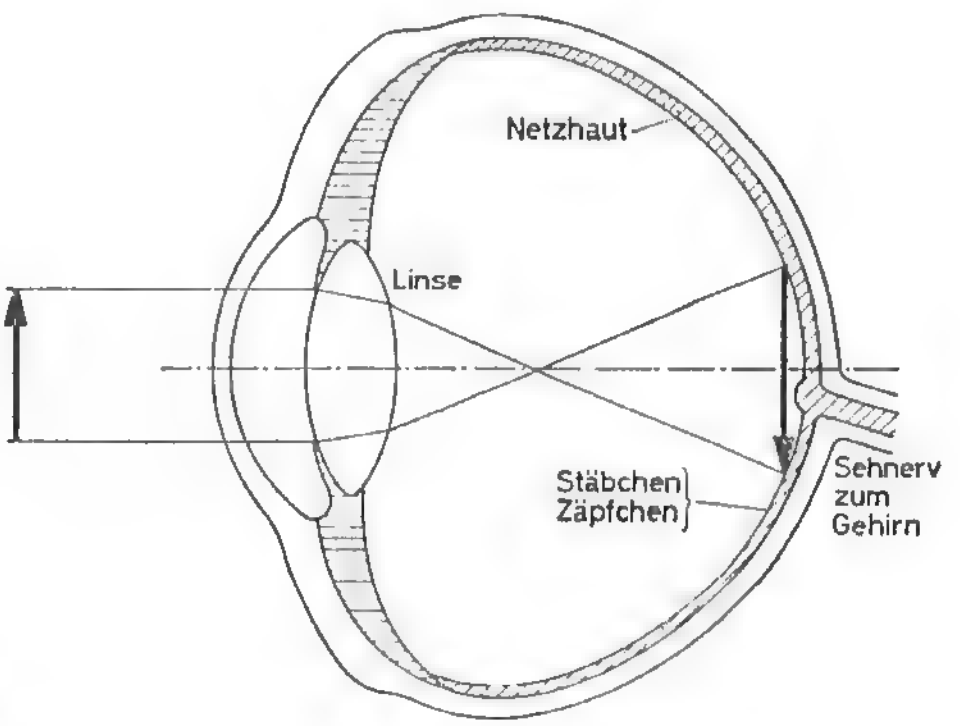


Abb. I. 2. 1. Querschnitt des Auges.

Der fast kugelförmige Körper des Auges besitzt vorne in der Mitte die durchsichtige Hornhaut, hinter der die Iris mit der Pupille und die Kristall-Linse folgt. Das Innere des Auges besteht aus einer gallertartigen Masse, die von der Netzhaut umschlossen ist. Von dieser Netzhaut führen Verbindungen zum Sehnerv, der die Lichtreize zum Sehzentrum des Gehirns weiterleitet. Die eigentlichen Lichtempfindungen werden auf der Netzhaut hervorgerufen, auf der optisch alle Gegenstände, die wir betrachten, scharf abgebildet werden. Maßgebend für die Sehempfindungen auf der Netzhaut sind die dort befindlichen lichtempfindlichen Organe.

Es handelt sich um zwei große Gruppen, einmal die sogenannten Stäbchen und zum anderen die Zäpfchen. Der wesentliche Unterschied zwischen den Stäbchen und Zäpfchen besteht darin, daß wir mit den Stäbchen nur Helligkeitsempfindungen wahrnehmen, also alle Gegenstände schwarz-weiß sehen, während die Zäpfchen farbempfindlich sind. Insgesamt sind auf der Netzhaut über einhundert Millionen Stäbchen und fünf bis zehn Millionen Zäpfchen vorhanden, wobei überwiegend jeweils nur eine der beiden Gruppen in Tätigkeit ist. Fällt viel Licht auf die Netzhaut, so treten die Zäpfchen hervor und die Stäbchen ziehen sich in die Netzhaut zurück. Wir können also im Hellen mit den Zäpfchen Farbempfindungen wahrnehmen und unterscheiden. Erhält dagegen die Netzhaut nur wenig Licht, so verhalten sich Zäpfchen und Stäbchen umgekehrt, d.h. die Stäbchen treten jetzt hervor und die Zäpfchen ziehen sich in die Netzhaut zurück. Bei geringer Helligkeit sehen wir also praktisch nur mit den Stäbchen und können keine Farben mehr unterscheiden. Dies erklärt die bekannte Tatsache, daß in der Dämmerung alle Gegenstände grau erscheinen. Zu einer guten Farbwahrnehmung gehört also eine ausreichende Helligkeit. Im Auge verhält es sich so, daß die Stäbchen zirka 10.000 mal lichtempfindlicher sind als die Zäpfchen.

Werden die lichtempfindlichen Organe der Netzhaut durch einfallendes Licht getroffen, so setzt ein fotochemischer Prozeß ein. Hierbei wird der sogenannte Sehpurpur, eine Verbindung aus Eiweiß und Farbstoff, ausgeblichen, so daß eine Aufspaltung zwischen Farbstoff und Trägereiweiß erfolgt. Diese Umwandlung hat eine Reizung des Sehnervs zur Folge, der im Sehzentrum unseres Gehirns den Seheindruck hervorruft. In der Zeit, in der die lichtempfindlichen Organe der Netzhaut nicht in Tätigkeit sind, wird der Sehpurpur regeneriert, d.h. er wird aus dem aufgespaltenen Farbstoff und dem Trägereiweiß wieder aufgebaut. Da dies eine gewisse Zeitspanne erfordert, können wir z.B. nach einem plötzlichen Helligkeitswechsel erst nach dieser Regeneration des Sehpurpurs wieder normal im Dunkeln sehen.

Obgleich man das menschliche Auge bisher sehr exakt und genau untersucht hat, gibt es wissenschaftlich noch keine völlig beweisbare Erklärung für die unterschiedliche Farbempfindung in den Zäpfchen. Es ist bisher nur festgestellt worden, daß es Zäpfchen gibt, die mit ihrem Sehpurpur auf bestimmte Farbzusammensetzungen verschieden stark reagieren. Insgesamt wurden drei Grundarten, die eine im Gebiet der roten Farbe, die zweite im Gebiet der grünen und die dritte im Bereich der blauen Farbe, festgestellt. Sowohl die Intensitätsempfindlichkeit, als auch der Umfang des wahrgenommenen Farbbereiches schwankt zwischen diesen drei verschiedenen Arten des Sehpurpurs. In Abb. I. 2. 2. sind die drei Intensitätskurven für die Farbempfindungen eingetragen. Da die Farbempfindung für die blaue Farbe sehr schwach ist, wurde der relative Maßstab hierfür um den Faktor 20 vergrößert. Die Summe der drei relativen Farbempfindungen ergibt die spektrale Helligkeitsempfindung, die in Abb. I. 2. 3. dargestellt ist. Das Maximum liegt bei etwa 500 mμ, einem Gelb-grün, wo auch das spektrale Energiemaximum des Sonnenlichtes liegt.

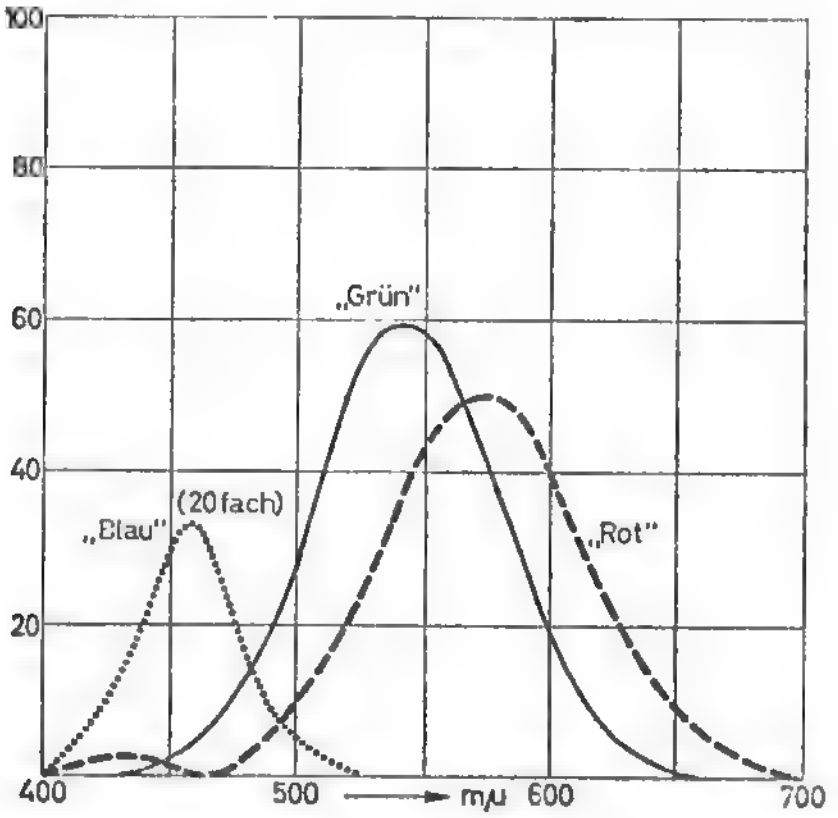


Abb. I. 2. 2. Relative Farbempfindungen.

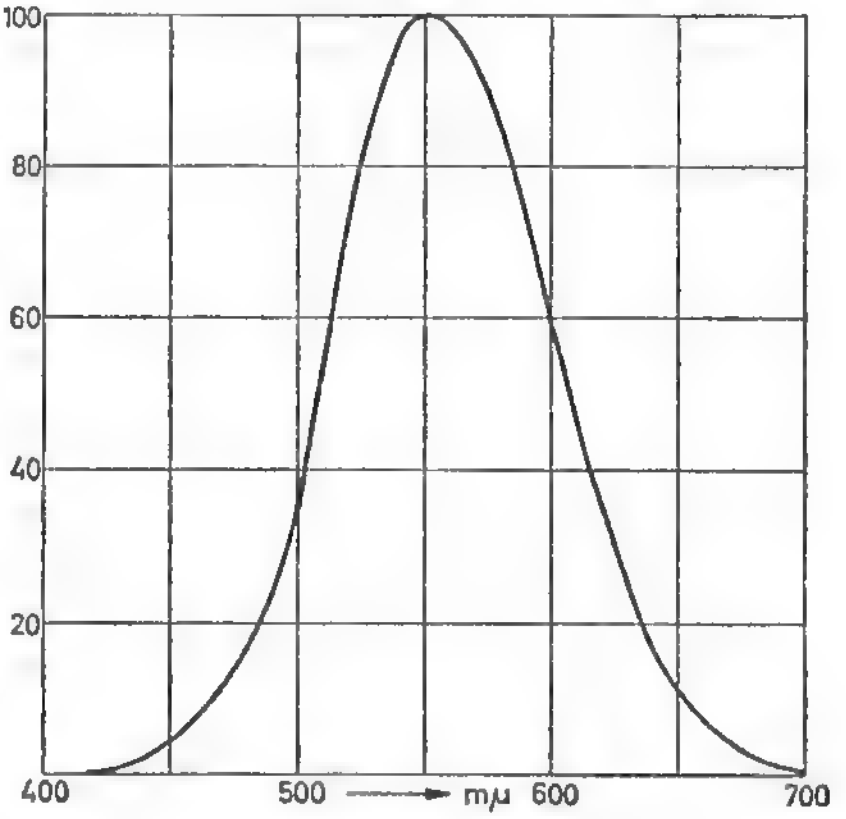


Abb. I. 2. 3. Spektrale Helligkeitsempfindung.

Aus diesen Tatsachen, daß drei verschiedene Intensitätsbereiche der Zäpfchen festgestellt wurden, entwickelte sich die Dreifarbentheorie, die auch die Basis für unsere Farbfernsehübertragung darstellt. Wie wir nachfolgend sehen werden, kann man nämlich bei richtiger Wahl von drei Primärfarben in den Bereichen der Farben Rot, Grün und Blau praktisch alle in der Natur vorkommenden Farben, einschließlich der weißen Farbe, durch additive Mischung herstellen.

Da in der Augenlinse eine Beugung der Lichtstrahlen stattfindet, müssen verschiedene Farben, bedingt durch ihre unterschiedlichen Wellenlängen, auch verschieden stark gebrochen werden. Die rote Farbe wird entsprechend der größten Wellenlänge am schwächsten gebrochen, während Grün und Blau, genau wie im Prisma, stärker gebeugt werden. Weil das menschliche Auge entsprechend der allgemeinen Helligkeitsempfindung und damit praktisch für die grüne Farbe eine scharfe Abbildung vornimmt, wird der Brennpunkt für Rot und Blau hinter bzw. vor der Netzhaut liegen. Dies ist stark übertrieben in Abb. I. 2. 4. angegeben. Praktisch bedeutet dies, daß feine Einzelheiten bestimmter Farben vom Auge nicht so gut aufgelöst werden können, wie reine Helligkeitsunterschiede. Dies ist ein äußerst wichtiger Punkt, den wir später bei der Festlegung der Farbdefinitionen in der Farbfernsehnorm wiederfinden werden. Diesem geringeren Farbauflösungsvermögen unseres Auges gegenüber Helligkeitsänderungen ist es nämlich zu verdanken, daß wir gewisse Farbinformationen mit wesentlich geringerer Bandbreite übertragen können, ohne dabei an Farbauflösung zu verlieren.

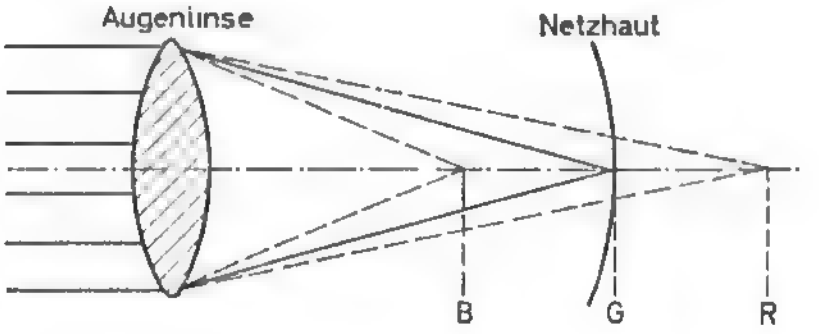


Abb. I. 2.4. Unterschiedliche Brennpunkte im Auge.

I. 3. Dreifarben-Theorie

Alle Lichtempfindungen im Auge werden bei genügend großem Helligkeitseindruck über die dann in Tätigkeit befindlichen Zäpfchen in drei Hauptgruppen aufgetrennt. Entsprechend den in Abb. I. 2. 2. angegebenen Intensitätskurven nehmen wir im Auge je eine Intensitätsempfindung im grünen, roten und blauen Farbbereich wahr. Daß wir trotzdem beliebig viele Farbabstufungen unterscheiden können, hängt damit zusammen, daß unser Auge bei einem empfangenen Lichteindruck aus der jeweiligen Anregung der drei Zäpfchengruppen eine Addition als Gesamtfarbwahrnehmung vornimmt. Wir können also trotz der drei Grundempfindungen Rot, Grün und Blau durchaus auch z.B. eine gelbe Farbe sehen, wenn nämlich die rote und die grüne Zäpfchengruppe gleichzeitig in entsprechendem Intensitätsverhältnis angeregt wird. Da man den gleichen Effekt erzielen kann, wenn beim Farbfernsehen zur Farbwiedergabe farbiges Licht durch Projektion zur Deckung gebracht wird, oder aber verschiedenfarbige Leuchtstoffe gleichzeitig Licht

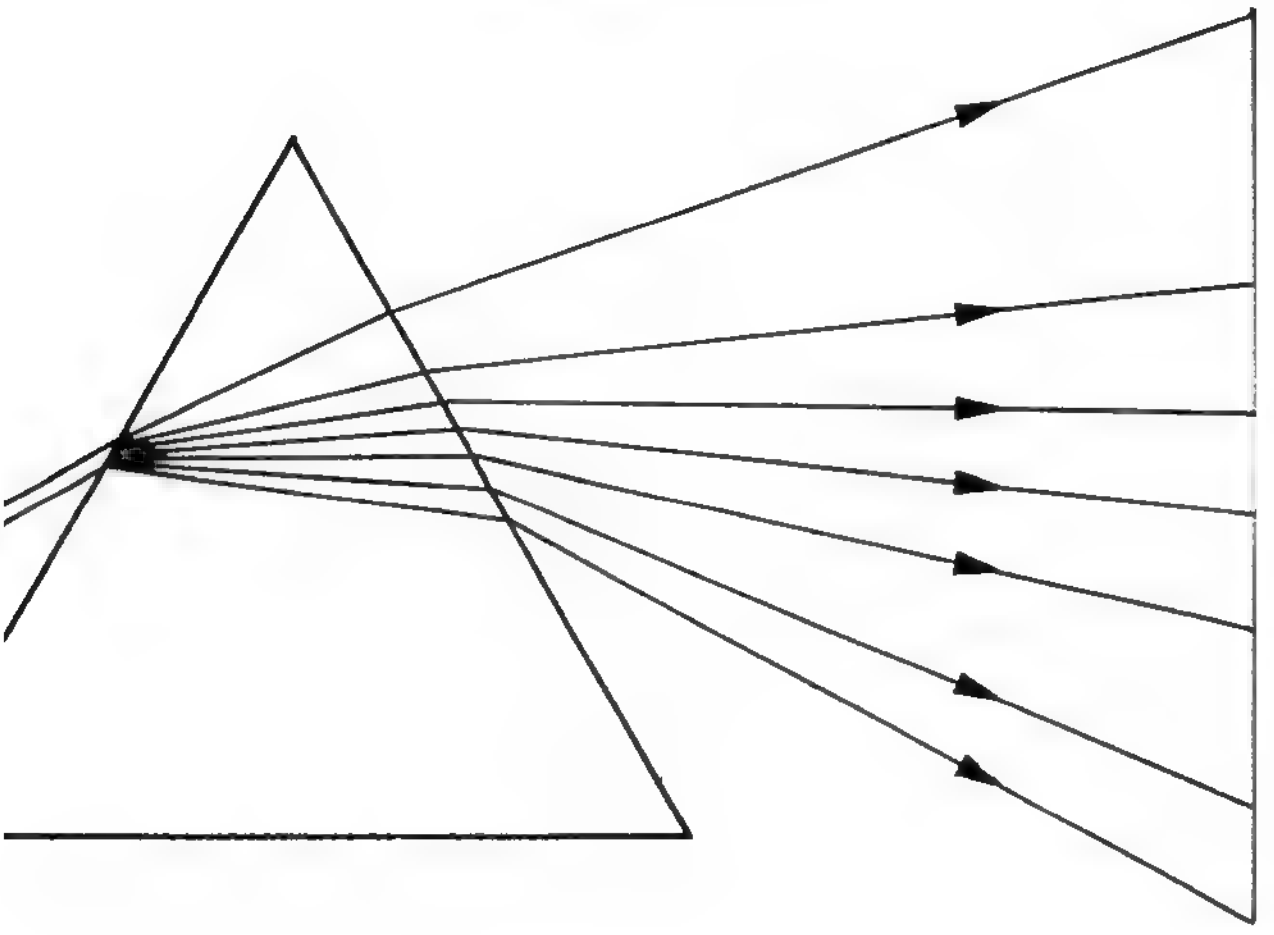


Abb. I. 1. 2. Zerlegung des Sonnenlichtes in die Spektralfarben

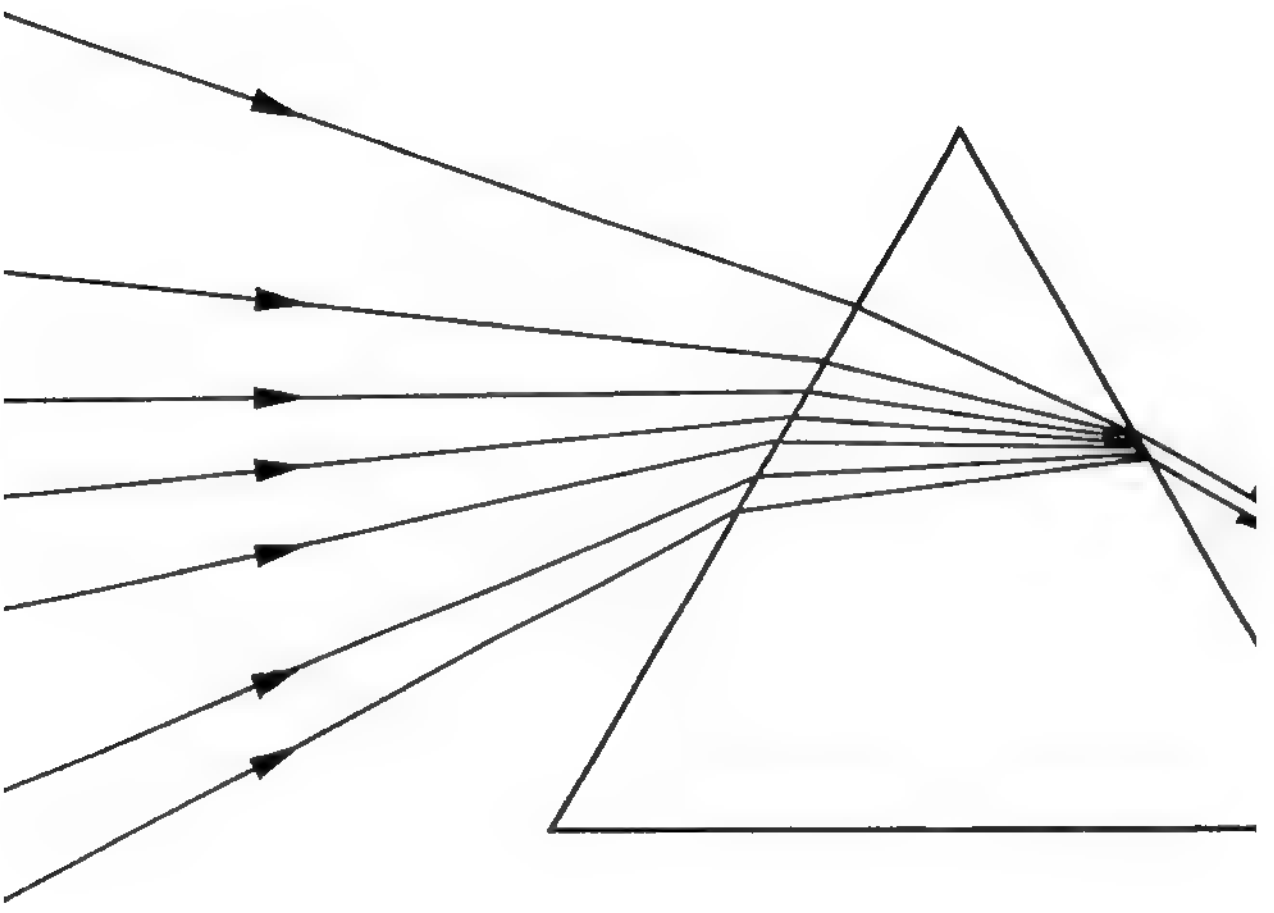


Abb. I. 1. 4. Addition der Spektralfarben.

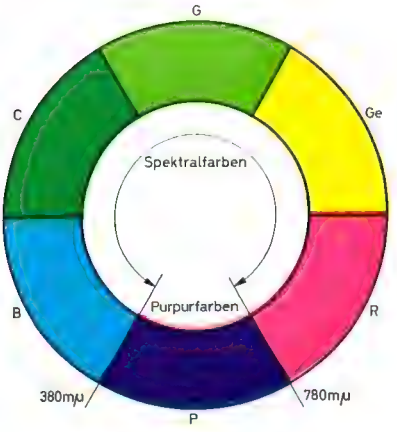


Abb. I. 3. 1. Farbkreis mit Primär- und Komplementärfarben.

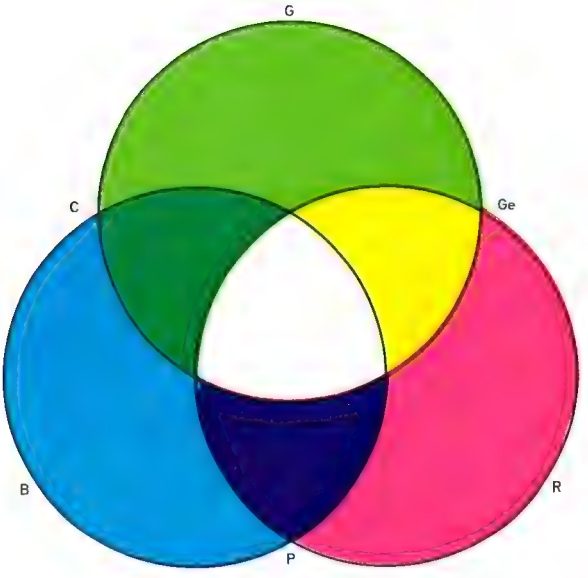


Abb. I. 3. 2. Additive Farbmischung.

ausstrahlen, müssen wir uns zunächst mit den Grundlagen der additiven Farbmischung beschäftigen.

Strahlt man z.B. eine weiße Fläche mit rotem Licht an, so leuchtet sie rot auf. In der gleichen Weise erscheint sie uns grün, wenn sie mit grünem Licht angestrahlt wird. Wird diese Fläche jetzt gleichzeitig von rotem und grünem Licht angestrahlt, so findet in unserem Auge die Addition der roten und grünen Lichtempfindung statt und wir nehmen einen gelben Lichteindruck wahr. Bestrahlt man die weiße Fläche gleichzeitig mit grünem und blauem Licht, so ergibt sich ein Farbeindruck, der eine blaugrüne Farbe darstellt, die wir als Cyan bezeichnen. Bei der gleichzeitigen Anwesenheit von rotem und blauem Licht bildet sich die Purpurfarbe. Diese Purpurfarbe tritt bei der Prismenbrechung in den Regenbogenfarben des Sonnenlichtes nicht in Erscheinung. Dies hängt damit zusammen, daß alle Purpurfarben, die sich durch die beiden Spektralfarben Rot und Blau ermischen lassen, keine selbständigen Spektralfarben darstellen, also nicht aus einer Strahlung einheitlicher Wellenlänge bestehen, sondern sich immer aus zwei verschiedenen Farbanteilen zusammensetzen. Deshalb kann man auch für die Purpurfarben im Gegensatz zu den Regenbogenfarben für den jeweiligen Farbton keine Wellenlänge angeben.

Betrachtet man unser sichtbares Licht von Rot (780 mμ) über Grün (500 mμ) bis Blau (380 mμ) als durchgehendes Strahlungsband mit verschiedenen Spektralfarben ganz bestimmter Wellenlänge, so kann man jeweils aus zwei Spektralfarben alle dazwischen liegenden Farbtöne oder Mischfarben herstellen, also z.B. aus der Spektralfarbe Rot und Grün alle Farbtöne von Rot über Orange und Gelb nach Grün. Der entstehende Farbton zwischen Rot und Grün wird hierbei durch die relativen Intensitätsunterschiede der beiden Spektralfarben Rot und Grün bestimmt.

Die Farbskala, die wellenlängenmäßig von Rot über Grün nach Blau verläuft, läßt sich durch die Mischfarbe Purpur zu einem geschlossenen Kreis ergänzen. Man kann also von Blau über die Mischung mit Rot und die dadurch entstehenden Purpurfarben zu einem geschlossenen Farbzyklus kommen. Dies ist als Farbkreis in Abb. I. 3. 1. (S. 8) angedeutet.

Unter den beliebig vielen Farbmischungsmöglichkeiten gibt es jeweils ein Farbenpaar, das in der Mischung „Weiß“ ergibt. Derartige Farbpaare bezeichnet man als Komplementärfarben. Die für uns wichtigsten Komplementärfarbpaare sind: Rot-Cyan, Grün-Purpur und Blau-Gelb. Alle drei Farbpaare ergeben im richtigen Amplitudenverhältnis gemischt den Farbeindruck „Weiß“. Projiziert man die drei Farben Rot, Grün und Blau so übereinander wie in Abb. I. 3. 2. (S. 8) angedeutet, erhält man neben den jeweiligen Mischfarben auch den Farbeindruck „Weiß“. Man erkennt noch

einmal, daß Rot und Grün gemischt Gelb ergibt, bei Grün und Blau erhält man Cyan und bei der Mischung von Blau und Rot die Purpurfarbe. Den Farbeindruck „Weiß“ kann man sowohl durch die Mischung je eines Komplementärfarbpaares Rot-Cyan, Grün-Purpur oder Blau-Gelb erzielen, als auch durch die Mischung der drei Farben Rot, Grün und Blau.

Um also alle Farbtöne durch additive Mischung herstellen zu können, genügt es, drei Spektralfarben auszuwählen, die als Primärfarben bezeichnet werden. Dabei müssen zwei der Farben an den Grenzen des sichtbaren Bereiches liegen, also bei Rot und Blau und die dritte Farbe in der Mitte bei Grün. Als Bedingung für die Wahl der Primärfarben muß nur gelten, daß keine der Farben sich aus den anderen beiden Farben ermischen läßt. Für das Farbfernsehen hat man nach dieser Methode die Primärfarben mit den Wellenlängen Rot = 610 mμ, Grün = 535 mμ und Blau = 470 mμ gewählt.

I. 4. Darstellung der Primärfarben im Farbdreieck

Wir haben bereits gesehen, daß drei voneinander unabhängige Primärfarben in den Farbbereichen Rot, Grün und Blau die Ermischung aller praktisch vorkommenden Farben ermöglichen. Um dies graphisch abbilden zu können, ist eine dreidimensionale Darstellung erforderlich. Man kommt also zu einer Abbildung in Würfelform. Die drei Würfelkanten sind dabei die Achsen für drei ideale Grundfarben, nämlich Blau, Grün und Rot, wie in Abb. I. 4. 1. angegeben.

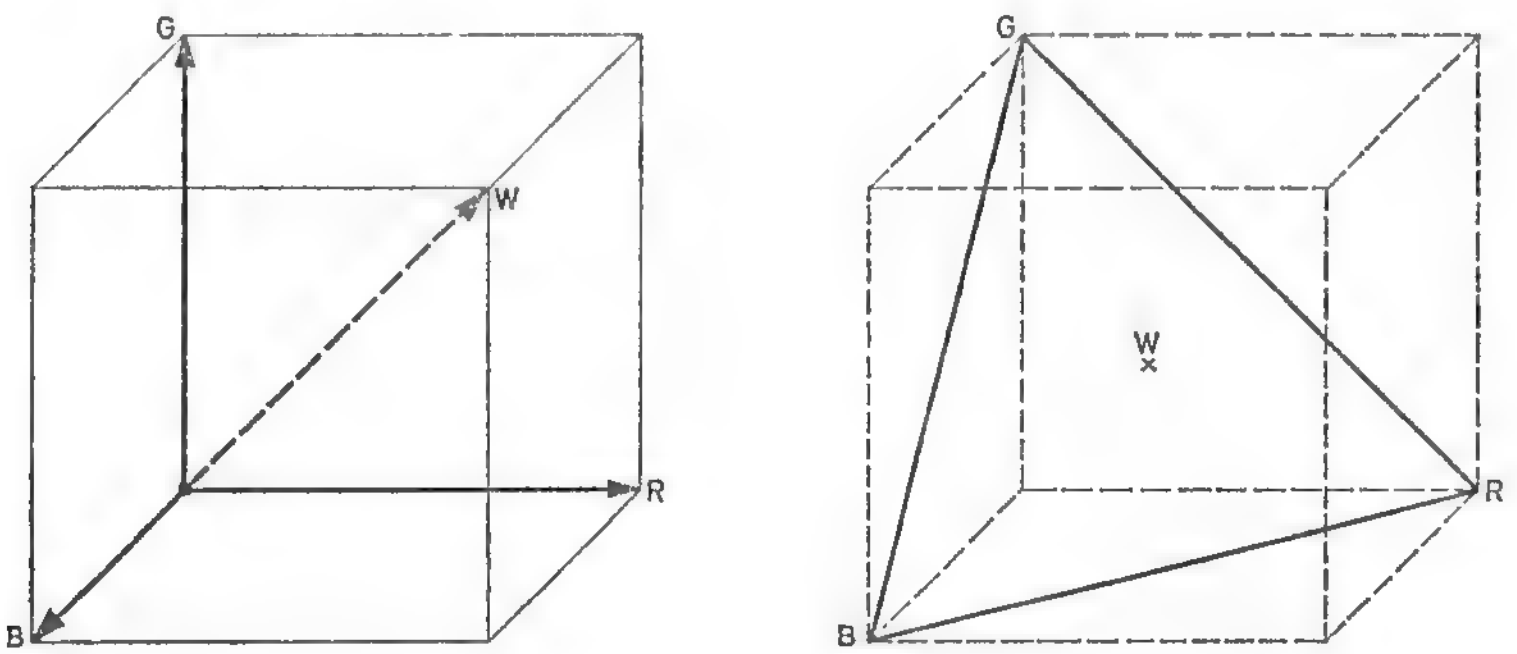


Abb. I. 4. 1. Räumliche Darstellung der drei Grundfarben.

Dies entspricht der normalen dreidimensionalen Darstellung mit den üblichen Achsen *X*, *Y* und *Z*. Die Würfelseite, die aus den beiden Achsen der Farben Blau und Grün gebildet wird, ergibt auf ihrer Fläche von der Farbe Blau bis zur Farbe Grün den Übergang über alle Abstufungen

zwischen diesen beiden Farben. Die Diagonale dieser Würfelfläche ist also die Farbe Blau-Grün, die wir mit Cyan bezeichnet hatten. In ähnlicher Weise ergibt die Diagonale der Würfelfläche, gebildet aus den beiden Farbachsen Rot und Grün, die Mischfarbe Gelb. Wir haben hier also den Übergang von den Farben Rot über Orange und Gelb bis zum Grün. Auf der dritten Würfelfläche erhält man aus den beiden Farben Blau und Rot die dazwischen liegenden Mischkomponenten als Purpurfarben. In dieser dreidimensionalen Darstellung läßt sich jeder beliebige Farbpunkt mit den entsprechenden drei Teilkomponenten innerhalb des Würfels festlegen. Werden die drei Grundfarben in gleichen Größen gemischt, so liegen alle Farborte auf der Würfeldiagonalen, die vom Nullpunkt unserer drei Farbachsen zur gegenüberliegenden Würfelecke läuft. Diese Würfeldiagonale stellt die Weißgerade dar, da in gleichen Größen gemischt die drei gewählten Grundfarben Weiß ergeben. Auf dieser Weißgerade liegt also die Abstufung der Leuchtdichte, d.h. für den Lichteindruck „Weiß" die Abstufung von Schwarz über Grau bis zum Weiß.

Geht man von der gleichen Leuchtdichte für alle drei Grundfarben aus, so kann man die Eckpunkte der drei Farbachsen verbinden und erhält eine diagonal im Würfel liegende Dreiecksfläche. Diese Dreiecksfläche kann dann getrennt dargestellt, als zweidimensionale Fläche behandelt werden, wie es die Abb. I. 4. 2. wiedergibt.

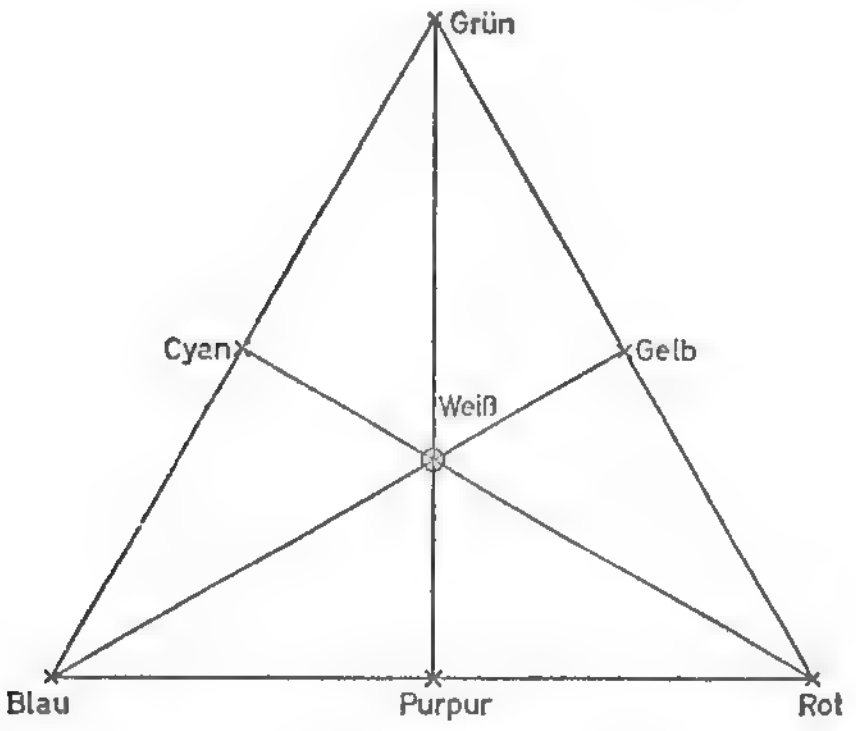


Abb. I. 4. 2. Primär- und Komplementärfarben

Die Eckpunkte der Dreiecksfläche bilden dabei die gewählten Grundfarben Blau, Grün und Rot, während der Weißpunkt, d.h. der Schnittpunkt der Würfeldiagonale mit dieser Dreiecksfläche im Schnittpunkt der Seitenhalbierenden liegt.

Die Seitenhalbierenden geben die Lage der drei Mischfarben Cyan, Gelb und Purpur an. Aus den Grundfarben Blau und Grün ergibt sich z.B. in der Mitte der Dreiecksseite die Mischfarbe Cyan, genauso wie man

aus den beiden Grundfarben Grün und Rot in der Mitte die Mischfarbe Gelb und aus Blau und Rot Purpur erhält.

Weiterhin kann man aus dieser Dreiecksdarstellung entnehmen, daß Rot mit Cyan, Grün mit Purpur und Blau mit Gelb jeweils ein Komplementärfarbenpaar darstellt, das in amplitudenrichtiger Mischung Weiß ergibt. Das, was in Abb. I. 3. 2. als additive Farbmischung aus den drei Grundfarben Rot, Grün und Blau angedeutet war, wird in unserer Dreiecksdarstellung in gleicher Weise wiedergegeben. Alle Verbindungslinien, die in unserer Dreiecksdarstellung durch den Weißpunkt laufen, ergeben in ihren Schnittpunkten auf den Dreiecksseiten je eine Farbe die, als Komplementärfarben im richtigen Verhältnis gemischt, den Helligkeitseindruck Weiß hervorrufen. Man erkennt, daß sich also beliebig viele derartige Komplementärfarbpaare finden lassen.

Um für die Spektralfarben unseres Sonnenlichtes zu einer einheitlichen Farbdefinition zu gelangen, hat man international die Eckpunkte eines Normalfarbdreieckes, d.h. die damit verbundene Wahl der idealen Grundfarben, als sogenannte „Eichreize“ festgelegt. Dies wurde von der Internationalen Beleuchtungskommission (I B K) vorgenommen.

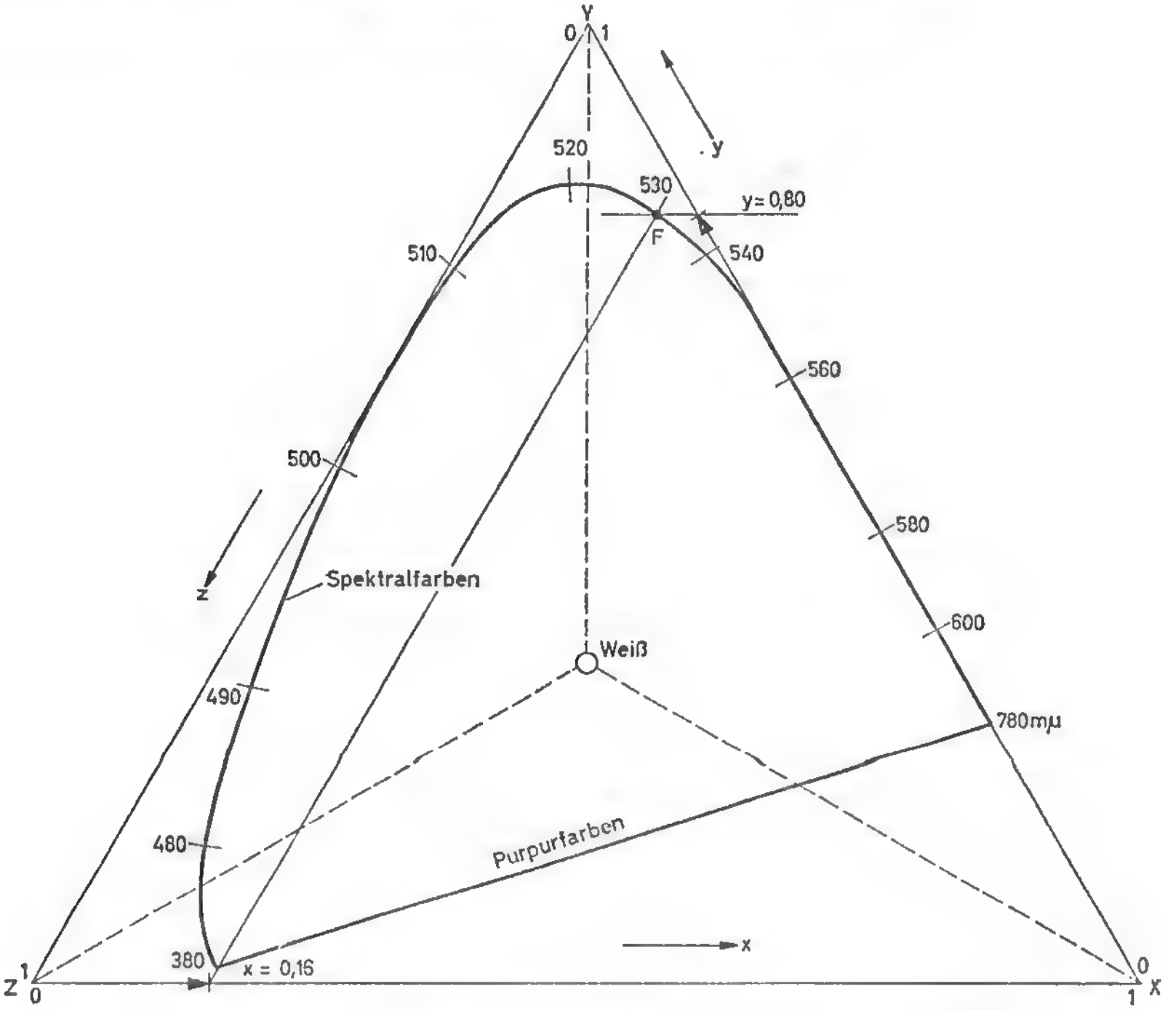


Abb. I. 4. 3. Spektralfarbenzug im Normal-Farbdreieck.

Als ideale Grundfarben wählte man die Spektrallinien mit den Wellenlängen 700 mμ, 546,1 mμ und 435,8 mμ, also jeweils Farbtöne im Gebiet der roten, grünen und blauen Farbe.

Im gleichseitigen Dreieck der Abb. I. 4. 3. stellen die mit X, Y und Z bezeichneten Eckpunkte diese gewählten idealen Grundfarben dar.

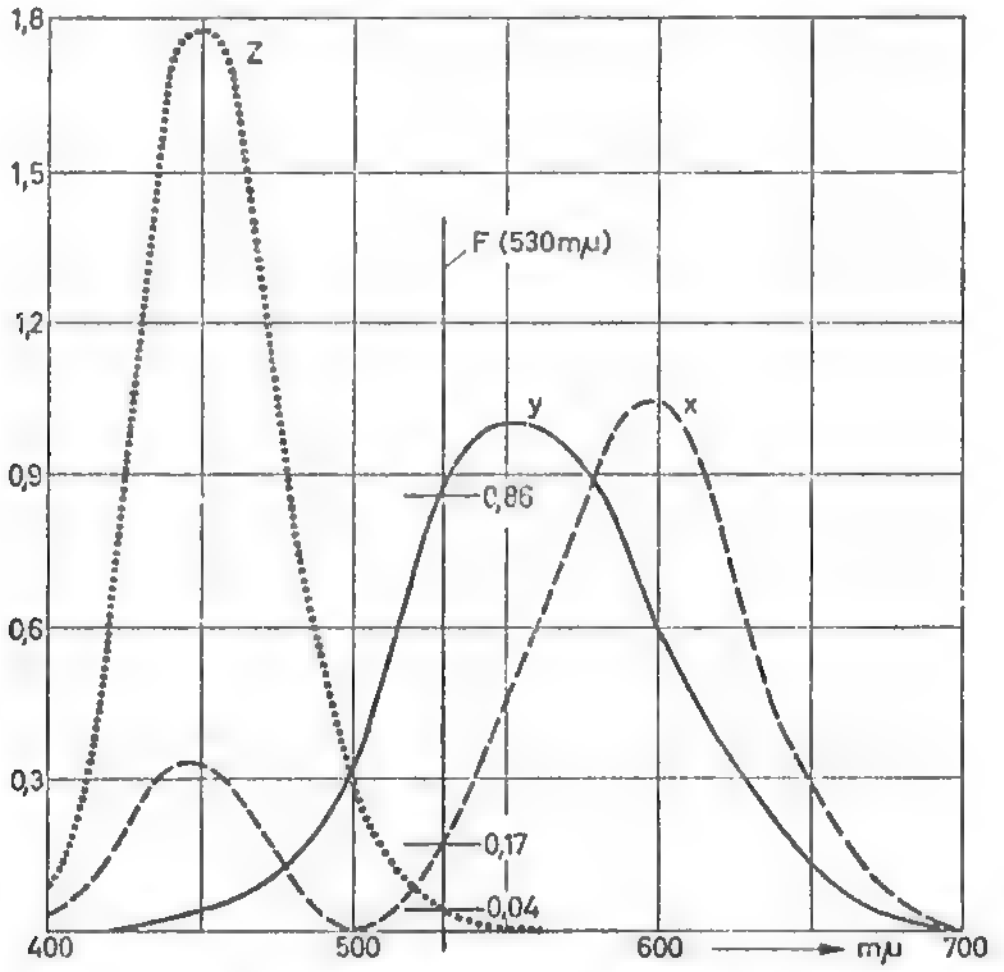


Abb. I. 4. 4. Normalfarbreize der drei Grundfarben zur Ermischung der Spektralfarben.

Ermischt man nun aus diesen so gewählten idealen Grundfarben die Farbtöne der im sichtbaren Bereich vorkommenden Spektralfarben unseres Sonnenlichtes zwischen 400 und 700 mμ, so kommt man zu relativen Mischkomponenten der drei Grundfarbanteile, wie es die Mischkurven in Abb. I. 4.4. wiedergeben.

Die punktierte Kurve Z bezieht sich dabei auf die Grundfarbe mit der Wellenlänge 435,8 mμ, die ausgezogene Y-Kurve auf die Grundfarbe mit 546,1 mμ, während die gestrichelte X-Kurve die Wellenlänge 700 mμ als dritte Grundfarbe wiedergibt. Die in diesen Kurven angegebenen Mischanteile werden auch als Normalfarbreize bezeichnet. Es wird sich z.B. eine Farbe Gelb-Grün mit einer Wellenlänge von 530 mμ aus den Normalfarbreizen $Z = 0{,}04$, $Y = 0{,}86$ und $X = 0{,}17$ ermischen lassen. Die Normalfarbreize hat man dabei so gewählt, daß bei gleicher Intensität alle drei Grundfarben gemischt „Weiß“ ergeben.

Der Weißpunkt liegt also genau wie bei unserer ursprünglichen Würfeldarstellung in der Mitte des gleichseitigen Farbdreieckes. Ferner wurden die Normalfarbreize so festgelegt, daß für die Grundfarbe Y mit der Wel-

lenlänge 546,1 mμ sich Mischanteile ergeben, die der Helligkeitsgrundempfindung unseres Auges entsprechen.

Die *Y*-Kurve in Abb. I. 4. 4. gleicht also praktisch der spektralen Helligkeitsempfindung, wie sie in Abb. I. 2. 3. angegeben war.

Die aus der Abb. I. 4. 4. zu entnehmenden relativen Normalfarbreize für unsere Spektralfarben des Sonnenlichtes kann man in die Dreiecksdarstellung der Abb. I. 4. 3. übertragen. Die Verbindung aller Punkte für die Spektralfarben ergibt dann den Spektralfarbenzug, der eine hufeisenähnliche Form erhält. Die Übertragung der einzelnen Werte soll an einem Beispiel erläutert werden. Wir wählen hierzu die mit *F* bezeichnete Farbe Gelbgrün von 530 mμ. Aus den Mischanteilen $Z = 0{,}04$, $Y = 0{,}86$ und $X = 0{,}17$ bilden wir die relativen Mischwerte, deren Summe jeweils 1 ergeben muß. Dies bedeutet, daß wir die drei Einzelwerte durch die Summe aller drei Werte dividieren müssen. Für den *X*-Anteil erhalten wir also $0{,}17 : 1{,}07 = 0{,}16$, für den *Y*-Anteil $0{,}86 : 1{,}07 = 0{,}80$ und der *Z*-Anteil bleibt praktisch 0,04. Da die relativen Werte aller drei Größen 1 sind, genügen zur Definition eines Farbpunktes in der Dreiecksdarstellung bereits zwei Werte. Wir müssen also in Abb. I. 4. 3. auf der Dreiecksseite, die die Größe *X* darstellt, den Wert 0,16 abtragen und von hier aus die Dreiecksnormale eintragen. Auf der Dreiecksseite, die die *Y*-Werte angibt, tragen wir den Anteil 0,80 ein und zeichnen wiederum die Dreiecksnormale ein. Der Schnittpunkt beider Dreiecksnormalen ergibt den Farbpunkt F mit seiner Wellenlänge 530 mμ.

Macht man dies für alle Spektralfarben zwischen 380 und 780 mμ, so erhalten wir als Verbindung aller Punkte den Spektralfarbenzug innerhalb dieser Dreiecksdarstellung. Die Verbindung der Spektralfarbpunkte 380 mμ und 780 mμ ergibt die Purpurlinie, auf der aus der Mischung der Spektralfarben Rot und Blau alle Purpurfarbtöne liegen. Der Spektralfarbenzug mit der Purpurlinie ergibt also eine Fläche, durch die alle in der Natur vorkommenden Spektralfarben einschließlich ihrer Mischkomponenten umfaßt werden.

Weil zur Dreiecksdarstellung zwei Größen ausreichend sind, kann man dieses gleichseitige Dreieck in ein einfaches rechtwinkliges Dreieck mit den Koordinaten *X* und *Y* umzeichnen.

Dies ist in Abb. I. 4. 5. durch eine Koordinaten-Transformation geschehen. Wählt man als rechtwinklige Koordinaten z.B. die Achsen *X* und *Y*, so braucht man nur die in Abb. I. 4.3. sich ergebenden *X*- und *Y*-Anteile in dieses rechtwinklige Koordinatenkreuz zu übertragen. Diese Form der Farbdreiecksdarstellung ist die meist gebräuchliche. Innerhalb des Spektralfarbenzuges muß man jetzt für das Farbfernsehen drei Primär-

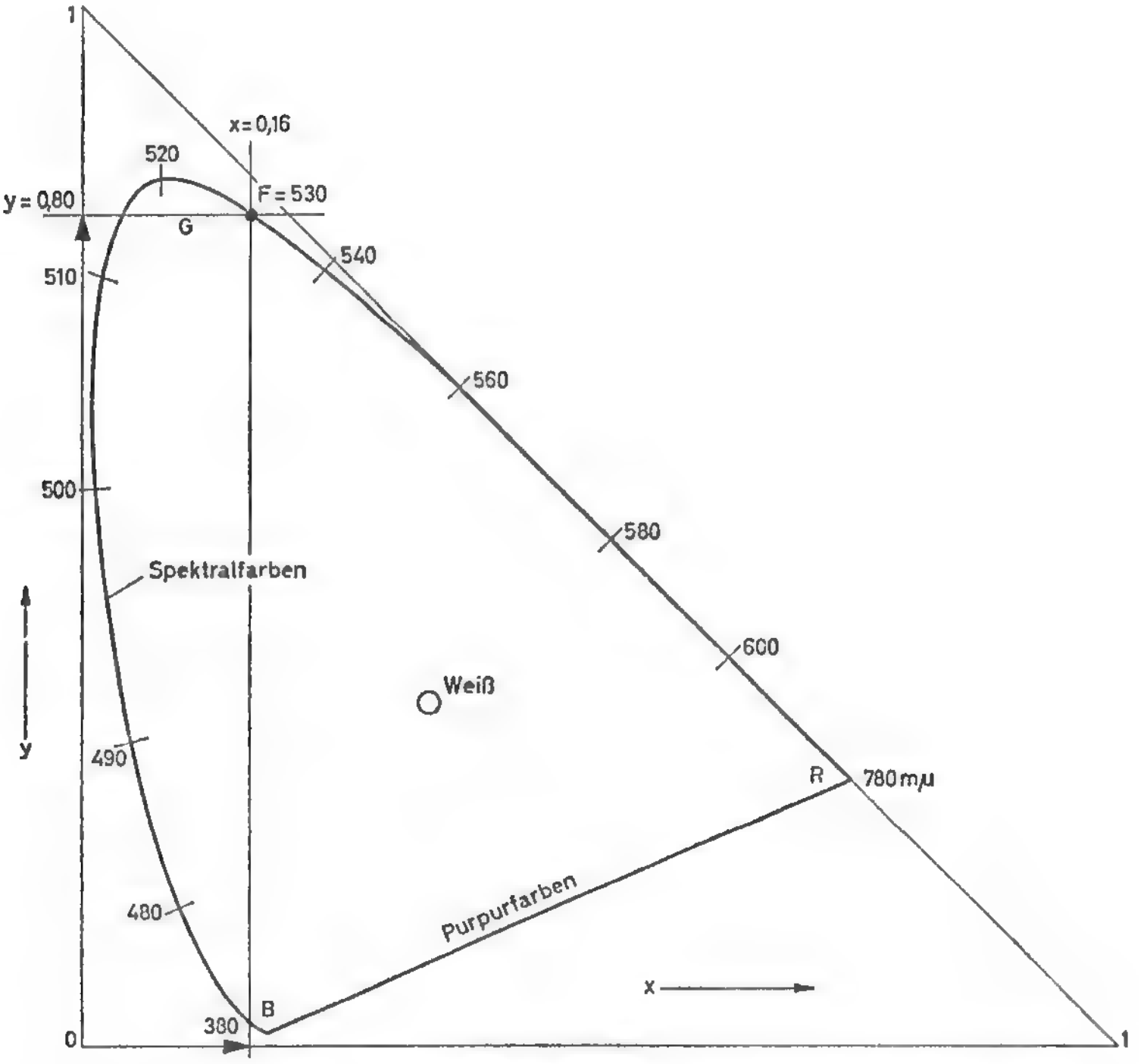


Abb. I. 4. 5. Vereinfachte Darstellung des Spektralfarbenzuges.

farben festlegen, die ein Maximum der Farbwiedergabe sicherstellen, wobei die erzielbare Farbwiedergabe durch die herstellbaren Phosphore bzw. Sulfide als Leuchtstoffe einer Bildröhre stark mitbestimmend sind. Da darüber hinaus in der Natur stark gesättigte Farben, die also in der Nähe der Hufeisenkurve des Spektralfarbenzuges liegen, sehr selten vorkommen, kann man in der Praxis für das Farbfernsehen ein Farbdreieck wählen, das innerhalb der Hufeisenkurve liegt und trotzdem praktisch alle natürlichen Farben wiedergibt.

Die für das Farbfernsehen gewählten Primärfarben Blau, Grün und Rot sind in Abb. I. 4. 6. eingetragen und haben folgende Koordinatengrößen:

	X	*Y*
Blau	0,14	0,08
Grün	0,21	0,71
Rot	0,67	0,33

Der Weißpunkt für die beim Farbfernsehen gewählten Primärfarben hat dabei die Koordinaten $X = 0{,}310$ und $Y = 0{,}316$. Für die Primärfarben ergeben die festgelegten Koordinaten eine Wellenlänge für Blau von ca. 470 mμ, für Grün von 535 mμ und für Rot von 610 mμ. Bei dieser Darstellung des Farbdreieckes in zweidimensionaler Form darf jedoch niemals vergessen werden, daß für die Farbmischung der drei Primärfarben immer eine dreidimensionale Darstellung nötig ist. Dies vereinfachte Farbdreieck gilt nur für einen Würfelschnitt, wobei Voraussetzung ist, daß in der Dreiecksflächendarstellung für die verschiedenen Farben die gleiche Grundhelligkeit, d.h. die gleiche Leuchtdichte vorhanden ist.

In Abb. I. 4. 7. ist das Farbdreieck mit dem Spektralfarbenzug und dem Weißpunkt farbig abgebildet. Es sind sowohl die Farbabstufungen mit den Mischfarben, als auch die Abnahme der Farbsättigung vom Spektralfarbenzug zum Weißpunkt hin zu erkennen. Neben den drei Primärfarben ist auch die mit Sulfiden als Leuchtstoffe einer Bildröhre erzielbare Farbwiedergabe eingetragen. Die durch einen Kurvenzug begrenzte innere

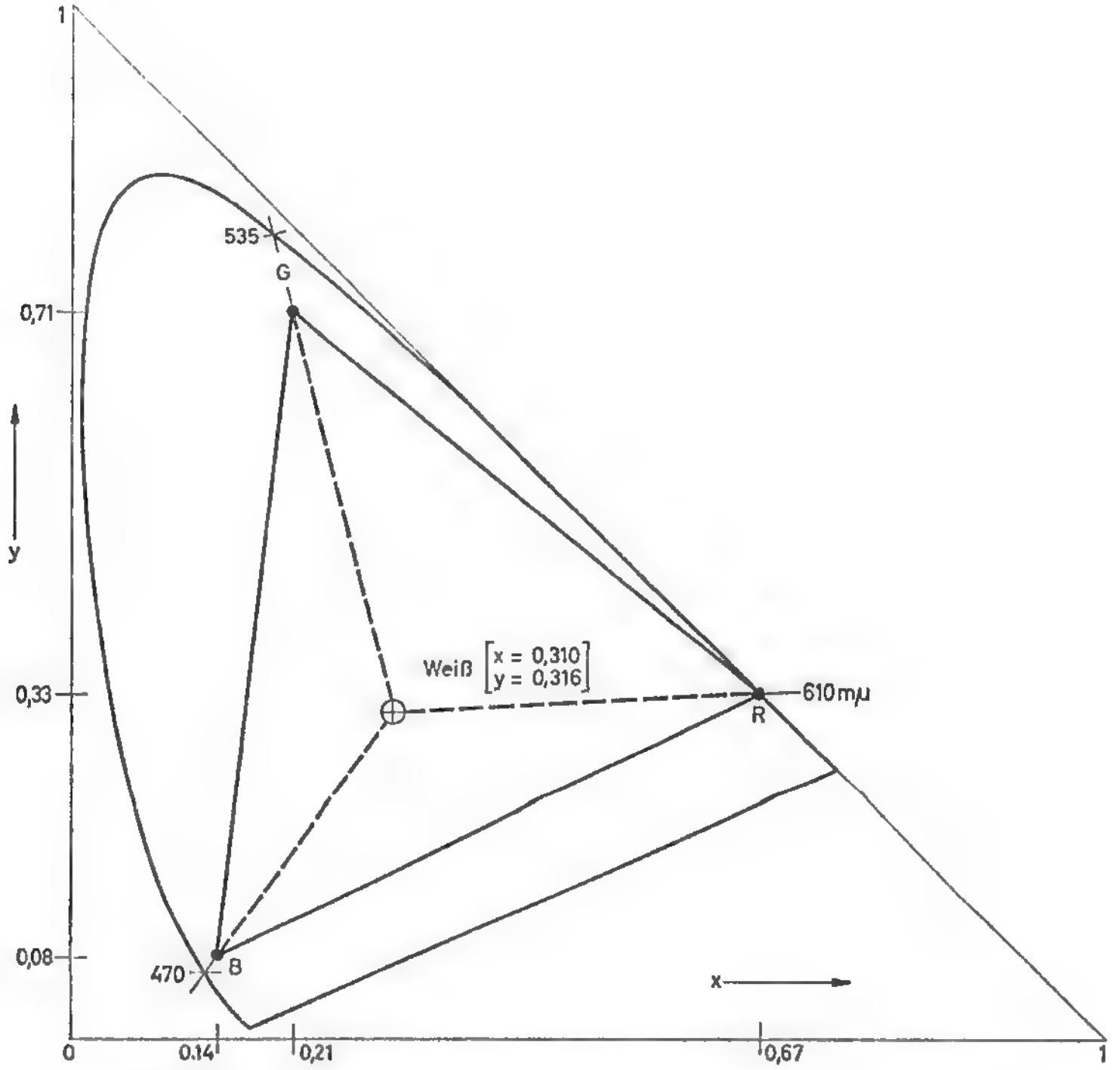


Abb. I. 4. 6. Lage der drei Primärfarben im Farbdreieck.

Fläche umschließt den größten Teil aller in der Natur vorkommenden Farben. Man erkennt, daß trotz eines verkleinerten Farbdreieckes bei der Farbwiedergabe in der Praxis keine spürbare Einschränkung auftritt.

I. 5. Farbton, Sättigung und Leuchtdichte

Neben der Darstellung einer beliebigen Farbart durch die relativen Amplitudenwerte der drei Primärfarben kann man diese Farbart auch mit anderen Größen charakterisieren. Diese anderen Größen, die die gleiche Aussagekraft für eine bestimmte Farbart haben müssen, bestehen aus den Begriffen Farbton, Sättigung und Leuchtdichte. Mit diesen drei Angaben ist jede Farbe exakt definiert.

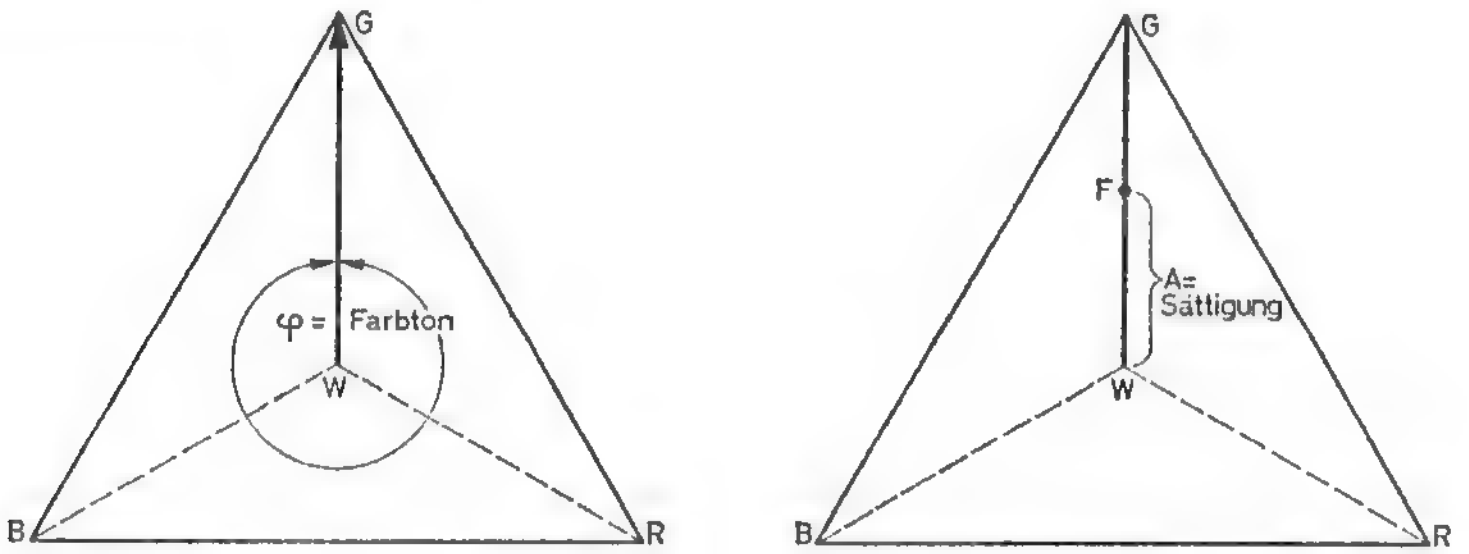


Abb. I. 5. 1. Darstellung von Farbton und Sättigung.

Um diese drei Größen anschaulich darstellen zu können, ist zunächst in Abb. I. 5. 1. ein gleichseitiges Farbdreieck dargestellt. Die Eckpunkte bestehen aus den Primärfarben Rot, Blau und Grün und in der Mitte liegt der Weißpunkt.

Ziehen wir vom Weißpunkt zu den Dreiecksseiten eine Gerade, so gibt die Lage dieses Vektors vom Mittelpunkt zu der Begrenzung des Farbdreieckes den Farbton an. Dies bedeutet, daß eine Drehung des Vektors um einen bestimmten Winkelbetrag φ eine Veränderung des Farbtones zur Folge hat. Von einem beliebig wählbaren Ausgangspunkt an kann man also die relative Lage des gedrehten Vektors als Indikation für den Farbton angeben. In dem ganzen Drehbereich von 360° werden also die drei Primärfarben mit allen vorkommenden Mischkomponenten überstrichen. Der Farbton definiert also die eigentliche Farbangabe, d.h. die Bezeichnung Rot, Grün, Blau usw. Mit dem Farbton ist damit die Wellenlänge der Farbe festgelegt.

Der zweite Begriff für die Charakterisierung einer Farbangabe ist die Sättigung, die vereinfacht ausgedrückt, z.B. den Unterschied zwischen

einem hellen und dunklen Grün bzw. einem hellen und dunklen Rot angibt. Der Farbton Rot einer bestimmten Wellenlänge kann also unserem Auge sowohl als tiefes, dunkles Rot erscheinen, als auch als helles Rosa, wobei in beiden Fällen der Farbton, also die Wellenlänge, gleichbleibt. Auch der Grundhelligkeitseindruck, d.h. die Leuchtdichte der Farbe, bleibt hierbei unverändert. Der wesentliche Unterschied zwischen einem tiefen, dunklen Rot und einem hellen Rosa mit gleicher Leuchtdichte und gleicher Wellenlänge besteht damit darin, daß zum Farbton Rot im Falle der rosa Farbe eine zusätzliche Weißkomponente, also ein Anteil von weißem Licht, hinzukommt. Die Sättigung gibt also den zusätzlichen Anteil von weißem Licht in einer Farbart an. Dieser Anteil des weißen Lichtes bei einer bestimmten Farbe ist in der Farbdreiecksdarstellung als relative Amplitudengröße des Farbvektors gegeben.

In Abb. I. 5. 1. ist ein Vektor vom Weißpunkt zum oberen Dreieckspunkt eingetragen. Eine 100% gesättigte grüne Farbe, d.h. ein grüner Farbton ohne zusätzliche Weißkomponente ist dann vorhanden, wenn der Farbpunkt im Farbdreieck in der Dreiecksspitze liegt, also der volle Vektor in ganzer Länge für die Farbkennzeichnung maßgebend ist. Der eingetragene Farbpunkt *F* auf dem Farbvektor bedeutet einen Farbton Grün mit einem Sättigungsgrad, der aus dem Verhältnis der Strecke *F - W*, zur Strecke *G - W* gegeben ist. Liegt der Punkt *F* genau auf der halben Vektorlänge, so ist ein 50% gesättigtes Grün gegeben. Mit diesen beiden Begriffen Farbton und Sättigung ist also in der üblichen zweidimensionalen Farbdreiecksdarstellung bereits jeder beliebige Farbpunkt innerhalb der Dreiecksfläche definiert. Man kann also vom Weißpunkt durch einen beliebigen Farbpunkt eine Gerade ziehen und erhält aus der Richtung dieser Geraden die Bestimmung des Farbtones, nämlich den Schnittpunkt mit der Dreiecksbegrenzung und aus dem relativen Verhältnis der Vektorlänge zwischen Farbpunkt und Weißpunkt die Angabe der Sättigung, d.h. den zusätzlichen Weißanteil in der bestimmten Farbart. Auf der Dreiecksumrandung liegen also alle 100% gesättigten Farben, während im Mittel-

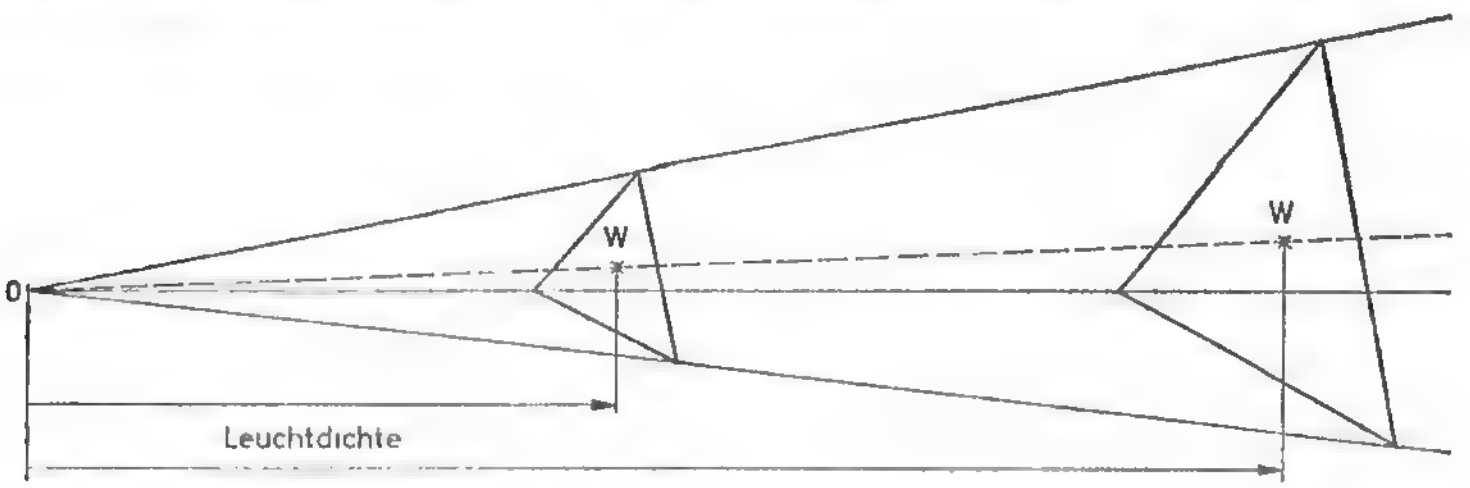


Abb. I. 5. 2. Darstellung der Leuchtdichte.

punkt alle Farben ungesättigt, d.h. als Weiß erscheinen. Sehr anschaulich geht dieser Begriff der Sättigung aus der farbigen Darstellung des Spektralfarbenzuges in Abb. I. 4. 7. hervor.

Neben den beiden Begriffen Farbton und Sättigung für die Definition einer bestimmten Farbart ist es noch notwendig, eine dritte Größe heranzuziehen, nämlich die Grundhelligkeit dieses Farbeindruckes, d.h. die Leuchtdichte. Wir hatten bereits gesehen, daß in einer Farbdreiecksdarstellung in der zweidimensionalen Form in der gesamten Dreiecksfläche alle Farben die gleiche Leuchtdichte besitzen. Farben mit unterschiedlicher Leuchtdichte ergeben andere Dreiecksflächen in unserer ursprünglichen Würfeldarstellung. Dies ist schematisiert in Abb. I. 5. 2. eingetragen.

Vom Nullpunkt ausgehend sind z.B. gleichmäßig wachsend zwei verschieden große Dreiecksflächen angedeutet. Die Entfernung der Dreiecksfläche vom Nullpunkt gibt hierbei ein direktes Maß für die Leuchtdichte an. Bei doppelter Leuchtdichte werden also auch alle Dreieckskoordinaten um den gleichen Faktor zunehmen, wobei innerhalb der Dreiecksfläche alle relativen Bezugsgrößen gleichbleiben. Zusammengefaßt sind alle drei Bezugsgrößen, nämlich Farbton, Sättigung und Leuchtdichte, in Abb. I. 5. 3. für verschieden große Dreiecksflächen mit der gestrichelt angedeuteten ursprünglichen Würfelform angegeben.

Ein beliebiger Farbpunkt *F* ist also mit seiner Leuchtdichte durch die Entfernung zum Nullpunkt festgelegt, während vom Weißpunkt der Drei-

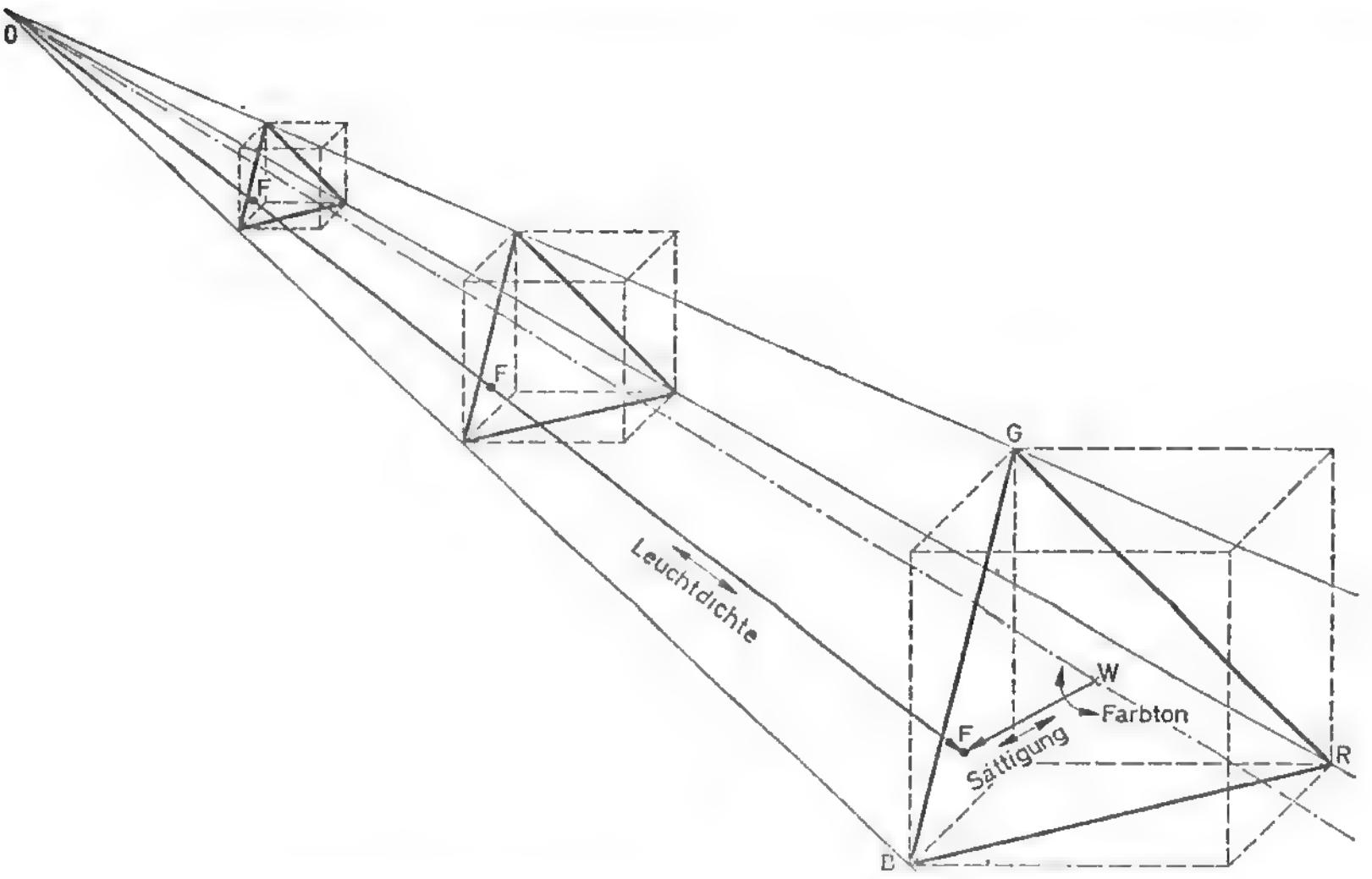


Abb. I. 5. 3. Räumliche Darstellung von Leuchtdichte, Sättigung und Farbton.

ecksfläche der Farbvektor zum Farbpunkt *F* in seiner relativen Lage den Farbton bestimmt und die Länge des Farbvektors zwischen dem Weißpunkt *W* und dem Farbpunkt *F* die Sättigung angibt.

In allen drei Dreiecksdarstellungen ist das relative Maß der Sättigung für den Farbpunkt *F* zum Weißpunkt *W* das gleiche und auch die Lage des Farbvektors für den Farbton bleibt von der Größe des Dreiecks unberührt.

Dies bedeutet, daß alle drei Größen Leuchtdichte, Farbton und Sättigung voneinander unabhängig sind, d.h. jede Änderung einer dieser drei Größen wirkt sich relativ gleich aus, unabhängig von der jeweiligen Größe der anderen beiden Komponenten. Es ist äußerst wichtig, daß man sich über diese drei Begriffe und ihre Bedeutung völlig im Klaren ist, da dies die Grundlage für die später erfolgende HF-Übertragung der Farbinformation darstellt. Dabei zeigt sich kein Unterschied, ob man auf drei unabhängigen Wegen die einmal gewählten Primärfarben Rot, Grün und Blau in ihren Einzelkomponenten überträgt, oder aber, ob man statt dessen die drei charakteristischen Merkmale einer beliebigen Farbe, bestehend aus Farbton, Sättigung und Leuchtdichte, hierfür benutzt. Warum man statt der drei zur Verfügung stehenden Primärfarben als Übertragungsgrößen die Werte für Farbton, Sättigung und Leuchtdichte wählt, hängt damit zusammen, daß man eine Farbfernsehnorm erhalten will, die es gestattet, mit vorhandenen Schwarz/Weiß-Fernsehempfängern ausgestrahlte Farbfernsehsignale als Schwarz/Weiß-Bilder zu empfangen. Diese Forderung wird mit Kompatibilität, d.h. Verträglichkeit mit der Schwarz/Weiß-Norm bezeichnet.

Zusammenfassung

Durch Beugung des Sonnenlichtes kann man nachweisen, daß dieses Sonnenlicht nicht aus einer einheitlichen elektromagnetischen Strahlung besteht, sondern sich aus verschiedenen Teilkomponenten zusammensetzt.

Diese Teilkomponenten sind die sogenannten Spektralfarben, d.h. verschiedene Farbtöne ganz bestimmter Wellenlängen. Unser Auge summiert die Reizeindrücke dieser gleichzeitig vorhandenen verschiedenen Farbkomponenten zur Lichtempfindung „Weiß“. Aus dieser Tatsache entwickelt sich die sogenannte Dreifarbentheorie, da man im menschlichen Auge drei Zäpfchengruppen nachweisen konnte, die jeweils im Gebiet der Farben Rot, Grün und Blau ein bestimmtes Reizmaximum besitzen. Duch Untersuchung der additiven Mischung verschiedener Farbkomponenten und internationaler Festlegung des Spektralfarbenzuges in Form einer Farbdreiecksdarstellung gelangte man für das Farbfernsehen zur Festlegung von drei Primärfarben. Diese drei Primärfarben bilden innerhalb

des Spektralfarbenzuges ein Farbdreieck, mit dem alle natürlichen Farben wiedergegeben werden können. Von der dreidimensionalen Darstellung der Farbmischung mit drei unabhängigen Teilkomponenten kommt man über das Farbdreieck zur Definition eines beliebigen Farbpunktes mit den charakteristischen Größen Farbton, Sättigung und Leuchtdichte. Diese drei Werte Farbton, Sättigung und Leuchtdichte, die zur vollständigen Beschreibung einer Farbart ausreichen, bilden die spätere Grundlage für die Informationsübertragung einer Farbfernsehsendung. Wichtig ist hierbei, zu erkennen, daß im Gegensatz zur Schwarz/Weiß-Übertragung für die Wiedergabe eines Farbpunktes drei unabhängige Übertragungsgrößen gewählt werden müssen, während bei der Schwarz/Weiß-Übertragung eine Größe für die Aussage der Helligkeit des Farbpunktes ausreicht.

KAPITEL II

KOMPATIBILITÄT VERTRÄGLICHKEIT DER FARB- MIT DER SCHWARZ/WEISS-FERNSEHNORM

Übersicht

Um die speziellen Eigenschaften und Forderungen für eine Farbfernsehnorm, die mit der bestehenden Schwarz/Weiß-Norm verträglich sein soll, kennenzulernen, wird zunächst die grundsätzliche Möglichkeit einer Farbübertragung betrachtet. Entsprechend den gewählten drei Primärfarben wird durch farbselektive Filteranordnungen vor den drei Aufnahmekameras eine Aufteilung des Lichtes vorgenommen. Die einfachste Übertragungsmöglichkeit besteht dann darin, diese drei Kamerasignale voneinander unabhängig auf getrennten Wegen zu übertragen, um dann auf der Empfängerseite durch drei Wiedergabeeinrichtungen die Farbauszüge Grün, Rot und Blau zu mischen. Um jedoch die Forderung der Kompatibilität zu erfüllen, muß der Bildträger bei der Farbübertragung mit einer Signalkomponente moduliert werden, die dem jeweiligen Leuchtdichtewert, also praktisch der Grundhelligkeit des zu übertragenden Bildes, entspricht. Da für diese Kompatibilitätsforderung sowohl die Ablenkfrequenzen, als auch der Bild-Tonträger-Abstand unverändert bleiben müssen, ergibt sich in der grundsätzlichen Amplitudencharakteristik zwischen Schwarz/Weiß- und Farbfernsehsendern kein nennenswerter Unterschied.
Die für die Definition einer beliebigen Farbübertragung zusätzlich benötigten Informationen Farbton und Sättigung werden als Farbartsignal zusammengefaßt. Ein zusätzlicher Farbträger, der an der oberen Video-Bandgrenze im Übertragungskanal liegt, wird in einer Zweiphasenmodulation mit dem Farbartsignal moduliert. Das Farbartsignal besteht dabei aus zwei Farbdifferenzspannungen, die entsprechend der unterschiedlichen Augenempfindlichkeit für bestimmte Farbkomponenten mit verschiedener Bandbreite übertragen werden. Aus diesen drei Informationen, nämlich dem Leuchtdichtesignal des Bildträgers, Farbton und Sättigung, werden im Empfänger die für die Wiedergabe benötigten Spannungen Rot, Grün und Blau zurückgewonnen.

II. 1. Grundsätzliche Möglichkeit einer Farbfernsehübertragung

Um eine Farbfernsehübertragung vornehmen zu können, muß man zunächst das zur Aufnahmekamera gelangende Licht in die drei Grundkomponenten Rot, Grün und Blau auftrennen. Diese drei Grundkomponenten müssen den festgelegten Primärfarben, die wir im vorhergehenden Kapitel im Farbdreieck kennengelernt haben, entsprechen. Ein Weg, dies zu erreichen, besteht in der Anwendung halbdurchlässiger Spiegel oder aber in der Benutzung von Filterscheiben. Sie müssen für die Farbdurchlässigkeit so dimensioniert sein, daß sie für die drei festgelegten Primärfarben mit den entsprechenden Farbmischkurven übereinstimmen.

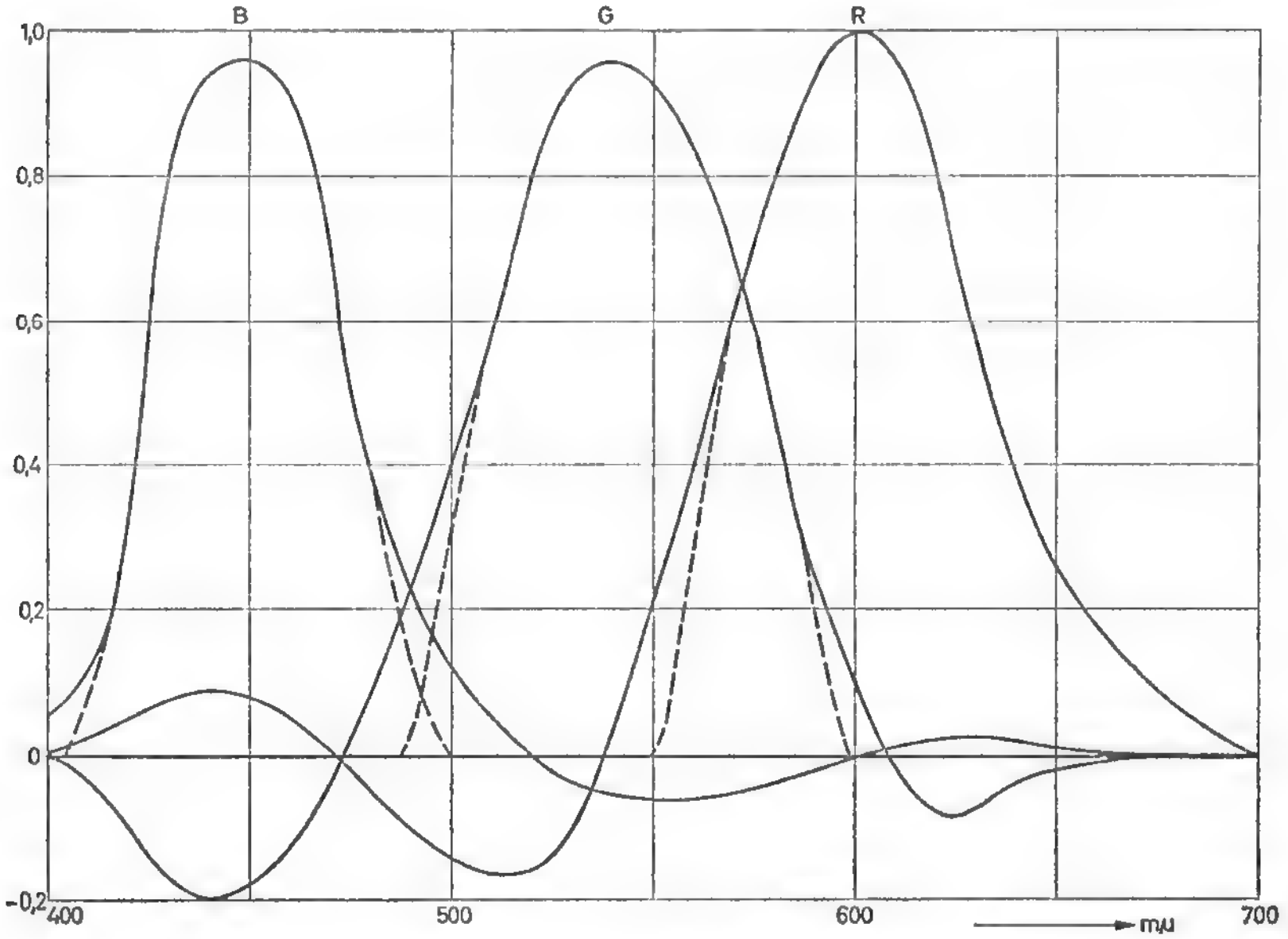


Abb. II. 1. 1. Farbmischkurven für die drei Primärfarben.

Diese Farbmischkurven sind in Abb. II. 1. 1. angegeben. Sie basieren darauf, daß, wie es bei der Definition und Festlegung der Primärfarben Voraussetzung war, bei gleichen Anteilen der Lichteindruck Weiß erhalten wird. Die negativen Amplitudenwerte der drei Farbmischkurven sind dadurch bedingt, daß man aus den drei festgelegten Primärfarbwerten nicht alle Farben des sichtbaren Spektrums ermischen kann. Zur Bestimmung der Farbmischkurven geht man nämlich so vor, daß auf einem sogenannten Farbmischgerät die darzustellende Farbe abgebildet wird und jetzt mit drei Lichtquellen, entsprechend den drei Primärfarben, der gleiche Farb-

eindruck eingestellt werden muß. Wenn dies nicht gelingt, muß man der Vergleichsfarbe einen bestimmten Anteil einer Primärfarbe zumischen, damit dann die Ermischung des völlig gleichen Farbeindruckes möglich ist. Dieser zusätzliche Anteil einer Primärfarbe zur Vergleichsfarbe stellt dann in den Farbmischkurven den negativen Amplitudenwert dar. Es handelt sich also bei den negativen Amplitudenwerten keinesfalls um wirkliche negative Farben, die ja auch physikalisch gar nicht existieren. Die gestrichelt in Abb. II. 1.1. eingetragenen Linien der Farbmischkurven deuten an, welchen Farbdurchlässigkeitsbereich z.B. drei Farbfilter besitzen müssen, damit je eine Aufnahmekamera die spektrale Empfindlichkeit im Bereich der roten, blauen oder grünen Primärfarbe besitzt.

Dieser gestrichelt angedeutete Kurvenverlauf gestattet die amplitudenrichtige Farbmischung ohne die negativen Amplitudenwerte. Statt der Filterscheiben, kann man auch halbdurchlässige Spiegel benutzen, die den gleichen spektralen Lichtdurchlässigkeitsbereich aufweisen.

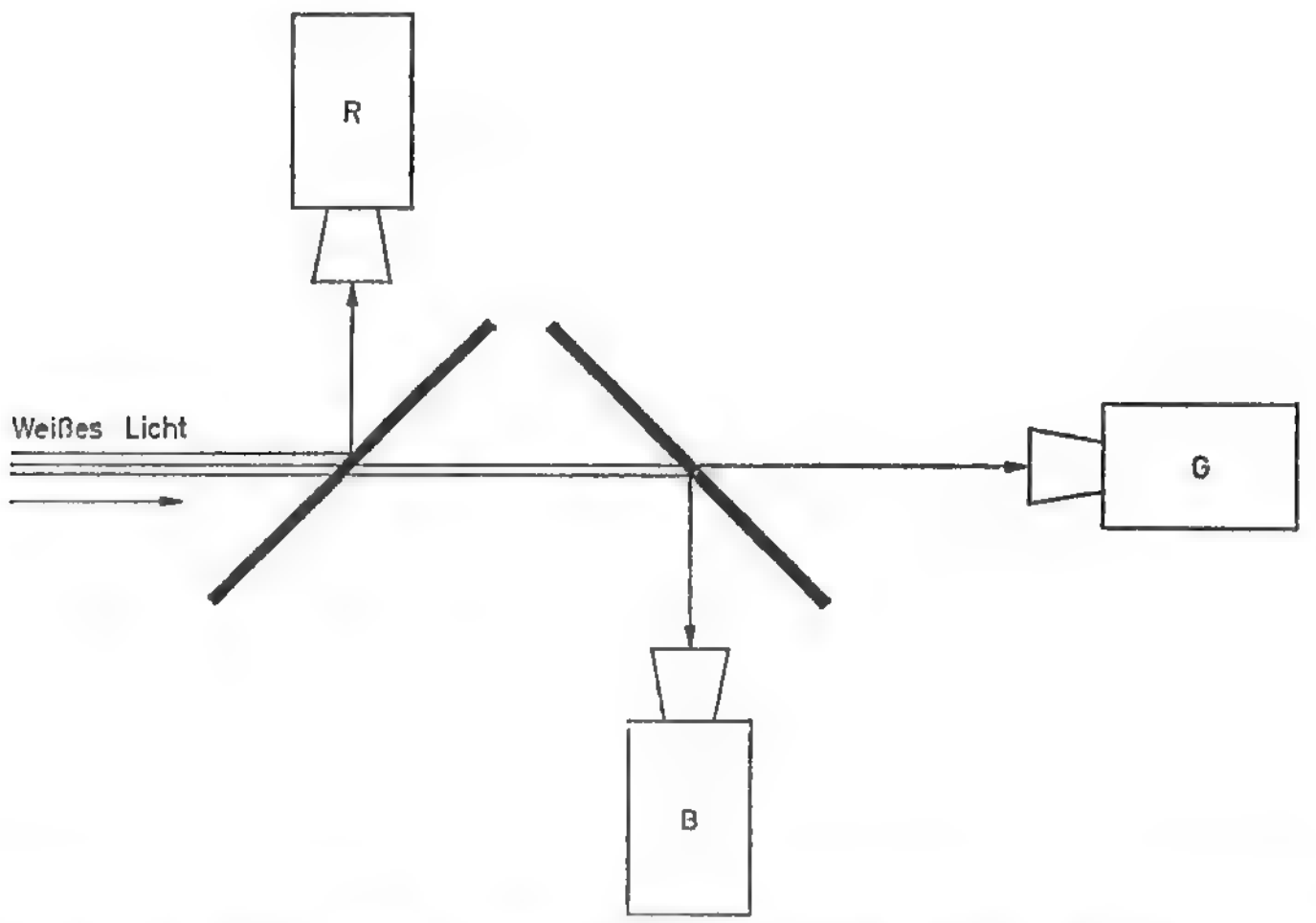


Abb. II. 1. 2. Auftrennung des weißen Lichtes durch halbdurchlässige Spiegel.

Dieses System ist in Abb. II. 1. 2. angedeutet. Es sind drei Aufnahmekameras, jeweils für die rote, grüne und blaue Primärfarbe, so angeordnet, daß das einfallende Licht über zwei diagonal liegende Spiegel zu den drei Kameras gelangen kann. Die Spiegel sind so beschaffen, daß z.B. der erste Spiegel vor der roten Kamera das rote Licht reflektiert, während die Blau- und Grünkomponenten von diesem Spiegel durchgelassen werden. Der zweite Spiegel reflektiert das blaue Licht und läßt die Grünkomponente

passieren. Damit wird also ein weißer Lichtstrahl in seine drei Grundkomponenten entsprechend den drei Primärfarben Rot, Grün und Blau aufgeteilt. Jede der drei Kameras erhält damit, unabhängig von der Zusammensetzung des einfallenden Lichtes, nur die spektrale Zusammensetzung der für sie maßgebenden Primärfarbe, entsprechend den Farbmischkurven der Abb. II. 1. 1. Alle übrigen Methoden und Anordnungen, die vor der Farbaufnahmekamera benutzt werden können, basieren auf dem gleichen Grundprinzip, nämlich vor der Aufnahmekamera auf optischem Wege aus dem einfallenden Licht eine Aufspaltung in die drei Grundkomponenten entsprechend der Farbmischkurve für die drei Primärfarben zu erzielen. Die drei Aufnahmekameras werden dann so eingepegelt, daß bei dem Lichteindruck Weiß die Ausgangsspannungen gleich groß sind. Auf der Wiedergabeseite, also im Farbfernsehempfänger, muß dann analog dazu eine rote, grüne und blaue Lichtquelle mit gleichen Intensitätsgrößen additiv zur Mischung gebracht, wiederum den Lichteindruck Weiß erzeugen.

Wenn wir zunächst den Übertragungsweg als solchen außer acht lassen, dann kommen wir zu einer schematischen Farbfernsehübertragung, wie sie in Abb. II. 1. 3. wiedergegeben ist.

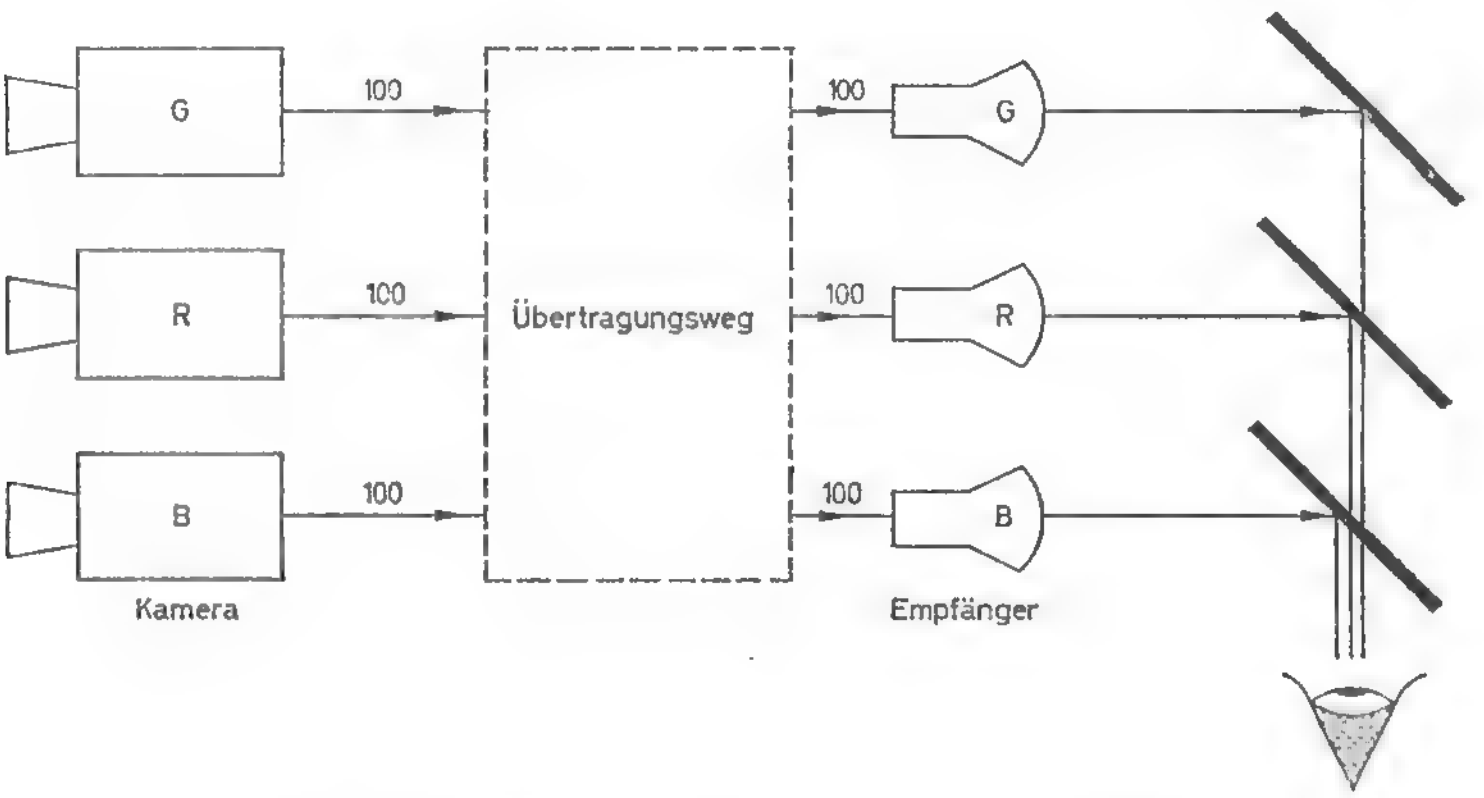


Abb. II. 1. 3. Schematische Farbübertragung.

Drei Aufnahmekameras liefern bei vorhandenem Lichteindruck Weiß je ein gleich großes Ausgangssignal. Auf der Wiedergabeseite, also im Empfänger, werden drei getrennte Röhren blauer, grüner und roter Farbe in gleicher Intensität angesteuert und optisch zur Deckung gebracht. Es entsteht dann wiederum der vor der Kamera vorhanden gewesene Lichteindruck Weiß. Obgleich auch bei der Wiedergabe farbiger Bilder nach

sehr vielen verschiedenen Prinzipien vorgegangen werden kann, ist in allen Fällen das in Abb. II. 1. 3. angedeutete Grundprinzip die Grundlage für die Farbwiedergabe. Aus den Grundkomponenten Rot, Grün und Blau, die in irgendeiner Form getrennt erregt und zum Leuchten gebracht werden, erfolgt durch additive Mischung die farbrichtige Wiedergabe.

Als nächsten Schritt müssen für den Übertragungsweg zwischen der Aufnahmekamera und der Wiedergabeeinrichtung die grundsätzlichen Bedingungen und Forderungen festgelegt werden. Die einfachste Möglichkeit, drei verschiedene Farbkomponenten von der Senderseite zum Empfänger zu übertragen, ist offenbar die, drei verschiedene HF-Träger mit jeweils einer dieser drei Farbkomponenten zu modulieren. Dies würde, wie in Abb. II. 1. 4. angedeutet, unter der Voraussetzung gleicher Bandbreite jeder Farbkomponente, zur Folge haben, daß HF-mäßig die dreifache Bandbreite zur Farbübertragung, verglichen mit dem Schwarz/Weiß-Fernsehen, erforderlich ist.

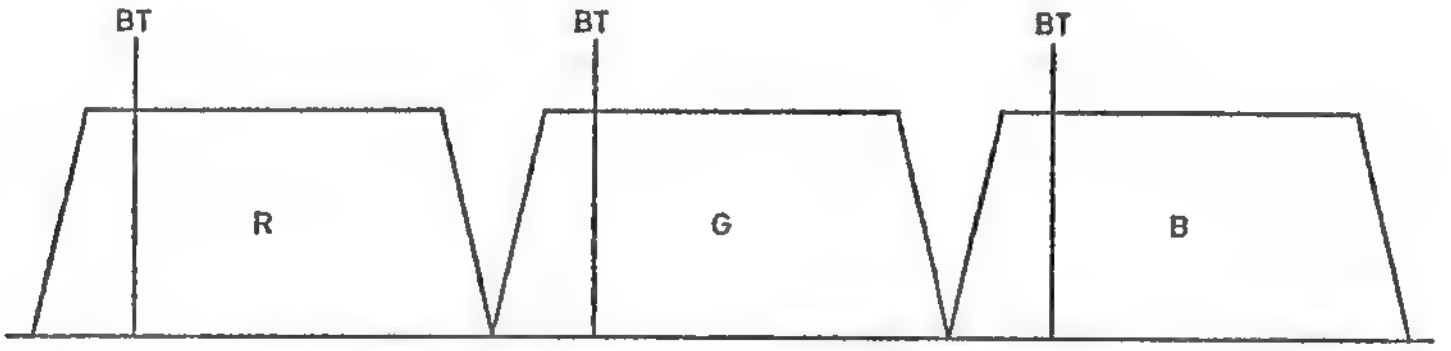


Abb. II. 1. 4. HF-Übertragung mit drei Trägern.

Diese gleichzeitige Übertragung aller drei Farbkomponenten über je einen Träger ist das Grundprinzip des Simultanverfahrens, d.h. der gleichzeitigen Übertragung aller drei Komponenten, wie wir es später auch in der Farbfernsehnorm wiederfinden werden. Neben diesem Simultanprinzip gibt es auch noch die Möglichkeit der Übertragung von drei Farbkomponenten in zeitlicher Folge nacheinander, also ein Sequenzverfahren. In den Vereinigten Staaten von Amerika hat man sehr umfangreiche Versuche beim Beginn des dortigen Farbfernsehens unternommen, um auch diese Möglichkeiten der zeitlich gestaffelten Übertragungsfolge der drei Farbkomponenten im Sequenzverfahren genauer zu untersuchen. Da diese Möglichkeiten mit ihren verschiedenen Varianten jedoch in der jetzt vorliegenden Farbfernsehnorm nich verwertet sind, sollen sie uns im einzelnen nicht näher interessieren. Aber auch die Übertragung des Farbsignals mit drei HF-Trägern hat zwei sehr große grundsätzliche Nachteile. Einmal wird eine wesentlich größere Bandbreite als bei der Schwarz/Weiß-Übertragung benötigt und damit eine schlechtere Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Frequenzbandes erzielt und zum anderen besteht keine

Möglichkeit, mit vorhandenen Schwarz/Weiß-Empfängern die Farbfernsehsendung als Schwarz/Weiß-Bilder wiederzugeben. Um diese Nachteile zu beseitigen, muß man eine Übertragungstechnik wählen, die recht kompliziert ist. Es wird hierbei ein zusätzlicher Träger benutzt, der mit im Übertragungskanal liegt und zwei getrennte Farbinformationen überträgt.

II. 2. Farbfernsehübertragung ohne Störung des Schwarz/Weiß-Empfanges

Um bei der Einführung des Farbfernsehens nicht ein völlig getrenntes Sendernetz und ein zusätzliches Farbprogramm schaffen zu müssen, besteht die Forderung, eine Farbfernsehnorm zu finden, die es gestattet, daß ausgestrahlte Farbfernsehsendungen vom Schwarz/Weiß-Empfänger ohne nachteilige Beeinflussung als Schwarz/Weiß-Bilder wiedergegeben werden. Darüber hinaus sollen auch die Farbfernsehempfänger so beschaffen sein, daß Schwarz/Weiß-Sendungen von ihnen als Schwarz/Weiß-Bilder empfangen werden. Diese Möglichkeit und Eigenschaft wird als Kompatibilität, d.h. als Verträglichkeit der Farbfernsehnorm mit der bestehenden Schwarz/Weiß-Norm, bezeichnet. Voraussetzung für diese Forderung nach einer vollen Verträglichkeit der Farbfernsehnorm mit der bestehenden Schwarz/Weiß-Norm ist zunächst, daß:

1. die Ablenkfrequenzen und damit die Horizontal- und Vertikalsynchronimpulse gleich bleiben,
2. der Bild-/Tonträger-Abstand sich nicht verändert,
3. der Kanalabstand und damit die Videobandbreite gleich groß bleibt,
4. die Bildträger-Information die Grundhelligkeit des Farbbildes enthält,
5. die zusätzliche Farbinformation so im Übertragungsbereich untergebracht wird, daß im Schwarz/Weiß-Empfänger keine sichtbare Störung auftritt.

Dadurch, daß die Ablenkfrequenzen unverändert bleiben, kann auch das bisherige Synchronimpulsschema des Schwarz/Weiß-Normsignals für das Farbfernsehen übernommen werden. In Kapitel VI werden wir sehen, daß alle wesentlichen Merkmale, wie Austastlücke, vordere und hintere Schwarzschulter, Vor- und Nachausgleichsimpulse usw. gleich geblieben sind und nur auf der hinteren Schwarzschulter der Horizontal-Synchronimpulse zusätzlich ein Farbträger-Synchronschwingungszug angeordnet wird.

Wenn ein Schwarz/Weiß-Empfänger eine Farbfernsehsendung als Schwarz/Weiß-Bild empfangen und wiedergeben soll, so muß neben dem unveränderten Bild-/Tonträgerabstand von 5,5 MHz auch die Modula-

tionstechnik beider Träger unverändert bleiben. Der Bildträger wird also amplitudenmoduliert in negativer Modulationsrichtung, d.h. zunehmende Helligkeit bedeutet abnehmende HF-Trägeramplitude. Der Tonträger ist frequenzmoduliert. Bei gleichbleibendem Kanalabstand steht für die HF-mäßige Übertragung der Farbinformation auch nur die 5 MHz Video-Bandbreite zur Verfügung. Man muß also durch eine besondere Übertragungstechnik innerhalb dieser Video-Bandbreite die gesamte Farbinformation, die ja aus drei unabhängigen Komponenten, nämlich der Leuchtdichte, dem Farbton und der Sättigung besteht, übertragen. Da der Schwarz/Weiß-Empfänger aus der Information des Bildträgers ein amplitudenrichtiges Schwarz/Weiß-Bild wiedergeben soll, muß der Bildträger des Farbfernsehsenders mit einem Signal moduliert werden, das der Leuchtdichte des farbigen Bildes, wie es von einer Schwarz/Weiß-Kamera gesehen und aufgenommen wird, entspricht.

Diese Leuchtdichtewerte sind dann die jeweiligen Grauwerte der verschiedenen Farbabstufungen. Neben diesem Leuchtdichtesignal werden aber noch die beiden weiteren voneinander unabhängigen Farbinformationen, der Farbton und die Sättigung, zur Farbübertragung benötigt. Die Sättigung und der Farbton werden dabei in einer speziellen Modulationseinrichtung, die wir später als Zweiphasenmodulation kennenlernen werden, einem Farbträger aufmoduliert. Dieser Farbträger liegt an der oberen Video-Bandgrenze, wobei die Festlegung des Frequenzabstandes zwischen zusätzlichem Farbträger und Bildträger bestimmte Bedingungen erfüllen muß. Dies wird im einzelnen gleichfalls in späteren Abschnitten näher erläutert.

Da das menschliche Auge für Farbunterschiede wesentlich unempfindlicher ist, als für Helligkeitseindrücke, kann man für die Farbinformation eine kleinere Bandbreite als für das Leuchtdichtesignal wählen. Man benutzt dabei zwei getrennte mit unterschiedlicher Bandbreite versehene Modulationsspannungen. Die eine Signalkomponente besteht aus einem Farbartsignal, das eine Bandbreite von $\pm$ 0,6 MHz besitzt. Bezeichnet wird diese Komponente als Q-Signal, während die andere Komponente als sogenanntes I-Signal eine Bandbreite von 1,8 MHz aufweist. Hieraus ergibt sich eine optimale Festlegung für den Farbträger mit einem Frequenzabstand von 4,4 MHz zum Bildträger. Damit auftretende Störungen im Schwarz/Weiß-Empfänger beim Empfang von Farbfernsehsendungen auf ein Minimum reduziert sind, wird HF-mäßig vom Farbfernsehsender dieser Farbträger nicht mit ausgestrahlt, sondern nur das Modulationsprodukt, d.h. die Farbinformation in Form von Seitenbändern dieses Trägers.

Darüber hinaus wählt man den Frequenzabstand zwischen Bild- und Farbträger so, daß zwischen ihnen eine starre Verkopplung vorgenommen wird, wodurch die Helligkeitseindrücke der verbleibenden Reststörung durch das Auge zeitlich integriert werden und sich aufheben.

Aus der Frequenzwahl des Farbträgers ergibt sich, daß für das *Q*-Signal eine normale Zweiseitenbandübertragung gewählt werden kann, während für das *I*-Signal eine Restseitenband-Übertragung benutzt werden muß. Die Bezeichnung *I*- und *Q*-Signal stammt aus der Modulationstechnik und bedeutet „Inphase" bzw. „Quadraturphase". Beide Signalkomponenten stehen, bedingt durch die Zweiphasenmodulation, senkrecht aufeinander, d.h. sie haben untereinander eine Phasenverschiebung von 90°. Das *Q*-Signal umfaßt dabei das Farbgebiet Blau-Purpur mit der Komplementärfarbe im Bereich des Farbtons Gelb-Grün, während das *I*-Signal die Farbtöne Orange bis Cyan umfaßt.

Zusammengefaßt stellen wir fest, daß die drei Informationsspannungen, unter Berücksichtigung der Kompatibilität, für die Farbübertragung folgendermaßen aufgebaut sind:

1. Aus allen drei Grundfarben wird, entsprechend der Leuchtdichte des zu übertragenden Signals, eine Modulationskomponente gebildet, die dem Bildträger aufmoduliert und mit der vollen zur Verfügung stehenden Bandbreite von 5 MHz, wie beim Schwarz/Weiß-Fernsehen, übertragen wird.
2. Zusätzlich wird ein Farbartsignal, das in einer speziellen Modulationsschaltung einem zusätzlichen Farbträger aufmoduliert wird, aus zwei voneinander unabhängigen Signalkomponenten gebildet. Die Auswahl dieser beiden Signalkomponenten für das Farbartsignal wird so vorgenommen, daß im Bereich des geringsten Auflösungsvermögens für unser Auge die Farbkomponenten zwischen einem Blau-Purpur und Gelb-Grün mit 600 kHz Bandbreite und das zweite Signal im Bereich der Farben Orange und Cyan mit der Bandbreite von 1,8 MHz übertragen werden. Der elektrische Aufbau dieser beiden Signale, resultierend aus dem Farbdreieck, ist so gewählt, daß, wie später noch näher erläutert wird, das Farbartsignal dabei die Werte für die Farbsättigung und den Farbton enthält, so daß zusammen mit dem Leuchtdichtesignal eine eindeutige Definition und damit auch Wiedergabe jedes innerhalb des Farbdreieckes liegenden Farbpunktes möglich ist.

II. 3. Forderungen für eine Farbfernsehnorm

Aus den Kompatibilitätsforderungen des vorigen Abschnittes ergibt sich für die Wahl einer Farbfernsehnorm, daß der bisherige Frequenz-

umfang und die Amplitudencharakteristik des Schwarz/Weiß-Fernsehsenders voll erhalten bleiben kann und nur eine Ergänzung zur zusätzlich benötigten Übertragung der speziellen Farbinformation vorhanden sein muß. Anhand der Abb. II. 3. 1. kann man diesen Vergleich anstellen und die Unterbringung der zusätzlichen Farbinformation im bisherigen Schwarz/Weiß-Kanal erkennen.

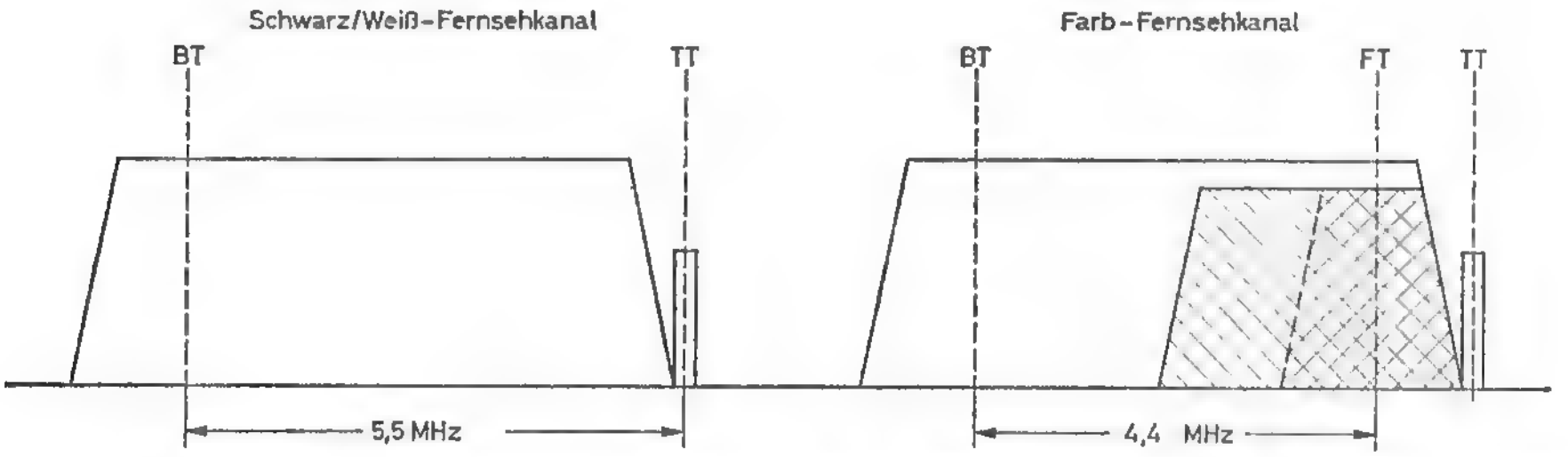


Abb. II. 3. 1. Amplitudencharakteristiken von Schwarz/Weiß- und Farb-Fernsehsendern.

An der oberen Video-Bandgrenze wird ein Farbträger, der mit Hilfe einer Zweiphasenmodulation zwei unabhängige Informationsspannungen überträgt, untergebracht. Die Frequenzwahl des Farbträgers muß hierbei bestimmten Bedingungen und Forderungen genügen. Da man für die Farbinformation zwei Informationsspannungen mit einer Bandbreite von $\pm$ 0,6 MHz bzw. + 0,6 MHz und — 1,8 MHz benutzt, muß der Farbträger mindestens 0,6 MHz von der oberen Video-Bandgrenze entfernt liegen. Bei einer Video-Bandbreite von 5 MHz bedeutet dies, daß die höchste Farbträgerfrequenz ca. 4,4 MHz sein kann.

Sowohl im Schwarz/Weiß- als auch im Farbempfänger können sich aber aus Farbträger und Bild- bzw. Tonträger Differenzfrequenzen bilden, die als Interferenzstörungen sichtbar werden. Genauso wie nämlich im Schwarz/Weiß-Gerät an der Videodiode aus Bild- und Tonträgerspannung die Intercarrier-Tonfrequenz von 5,5 MHz entsteht, kann sich bei Anwesenheit des Farbträgers im Gesamtsignal aus dem Farb- und Bildträger die Differenzfrequenz von 4,4 MHz und aus Farb- und Tonträger die Differenzfrequenz von 1,1 MHz bilden.

Zur Reduzierung dieser Interferenzstörungen werden verschiedene Maßnahmen ergriffen. Zunächst wird eine Modulationstechnik des Farbträgers benutzt, bei der der Farbträger selbst unterdrückt und HF-mäßig nicht mit ausgestrahlt wird. Dadurch ist im HF-Signal des Senders nur die Summe der Seitenbänder des Farbträgers als Modulationsprodukt vorhanden. Da jedoch das Modulationsprodukt noch eine Reststörung liefern kann, legt

man den Farbträger an die obere Video-Bandgrenze, weil eine Interferenzstörung dann am wenigsten sichtbar ist, wenn die Differenzfrequenz aus Farb- und Bildträger möglichst hoch ist.

Bei geschickter Wahl dieser Farbträgerfrequenz hat darüber hinaus die Interferenzstörung auf dem Bildschirm ein derartiges Muster, daß für unser Auge durch räumliche und zeitliche Integrationswirkung eine Aufhebung der Helligkeitseindrücke erfolgt. Dies kann, wie wir später sehen werden, mit einem Offsetverfahren durch Verkopplung des Bildträgers mit dem Farbträger erfolgen.

Bei einer Farbträgerfrequenz von 4,4 MHz kann die Farbsignalkomponente, die als *Q*-Signal bezeichnet wird, in der normalen Zweiseitenbandtechnik mit der hierfür notwendigen HF-mäßigen Bandbreite von $\pm$ 0,6 MHz übertragen werden. Die zweite Signalkomponente, das sogenannte I-Signal mit seiner maximalen Bandbreite von 1,8 MHz, erfordert eine Restseitenband-Übertragung, da die obere Bandgrenze durch die Gesamtamplitudencharakteristik des Bildträgers begrenzt wird. Das *Q*-Signal liegt also, bezogen auf den Bildträger, zwischen den Frequenzgrenzen 3,8 MHz und 5 MHz, während das I-Signal den Bereich von 2,6 MHz bis 5 MHz umfaßt.

Die Bandbreitenangaben für die beiden Farbinformationen des *I*- und *Q*-Signals sind in Abb. II. 3. 2. nochmals getrennt angegeben.

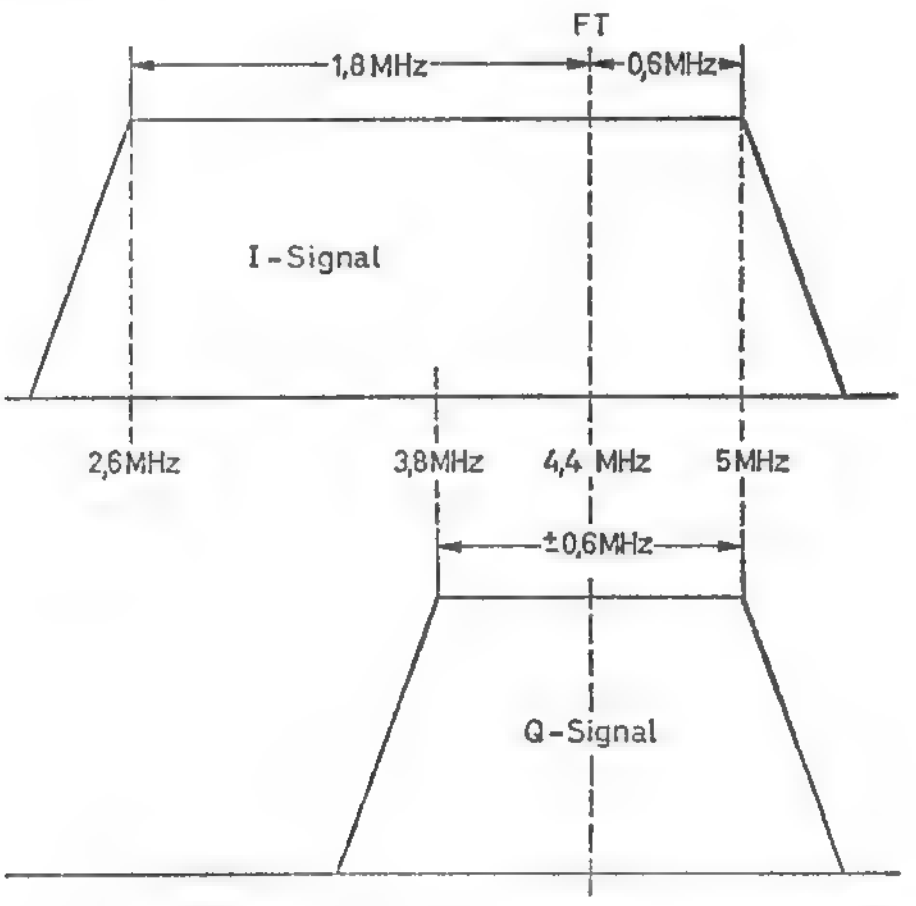


Abb. II. 3. 2. Bandbreiten der Farbinformationen.

In diesen beiden Frequenzgebieten, die sich um den Farbträger mit der festgelegten Frequenz von 4,4 MHz gruppieren, ist die gesamte zusätzliche Farbinformation, bestehend aus Farbton und Sättigung, untergebracht.

Obgleich sich die beiden Frequenzgebiete für das *I*- und *Q*-Signal über-

decken, tritt keine gegenseitige Beeinflussung auf, und es ist im Empfänger mit speziellen Gleichrichterschaltungen möglich, die beiden Signalkomponenten völlig unabhängig voneinander wiederzugewinnen. Dies wird in der Zweiphasenmodulation des Farbträgers dadurch erreicht, daß elektrisch die beiden Farbinformationsspannungen senkrecht aufeinander stehen. Es besteht also jederzeit zwischen den beiden *I*- und *Q*-Signalen eine Phasenverschiebung von genau 90°, wobei das vom Sender ausgestrahlte Farbsignal für die *I*- und *Q*-Komponente nur aus den Seitenbändern besteht, da der Farbträger selbst im Sender unterdrückt wird.

Durch die Verkopplung des Farbträgers mit dem Bildträger wird eine sogenannte Frequenzverkämmung der Leuchtdichtespannung mit der Farbträgermodulation erzielt. Wie wir später noch sehen werden, gibt es HF-mäßig statistische Häufungen als Seitenbänder zum Bildträger im jeweiligen Abstand mit Horizontalfrequenz. Dazwischen gibt es Frequenzlücken, in die man die Farbträgerinformation legen kann. Durch diese Übertragungstechnik wird die gegenseitige Beeinflussung zwischen Leuchtdichte- und Farbinformation auf ein Minimum reduziert.

Ist die Wahl der Frequenz des Farbträgers getroffen, muß nur noch die zusätzliche Möglichkeit zur Übertragung eines Synchronsignals für den Farbträger gefunden werden. Dieses zusätzliche Synchronsignal für den Farbträger ist deshalb erforderlich, weil der Farbträger zur Reduzierung der Interferenzstörungen vom Farbfernsehsender nicht mit ausgestrahlt wird. Die Rückgewinnung der Farbmodulationsspannungen im Empfänger ist aus den Seitenbändern des Farbträgers allein nicht möglich. Es muß hierfür der Farbträger wieder eingesetzt werden. Dies muß synchron mit der Phasenlage des Farbträgers beim Sender geschehen, weshalb ein zusätzliches Farbsynchronsignal benötigt wird. Wie später noch näher erläutert wird, wählt man hierfür einen Schwingungszug des Farbträgers, der auf der hinteren Schwarzschulter der Horizontal-Synchronimpulse sitzt.

Zusammenfassung

Voraussetzung für eine Farbübertragung ist zunächst die Auftrennung des Lichtes mit Hilfe von Filterscheiben oder halbdurchlässigen Spiegeln in die Primärfarbbereiche Rot, Grün und Blau. Die dazugehörigen Farbmischkurven legen dabei den entsprechenden Spektralbereich fest.

Aufgrund der Forderungen für eine gute Kompatibilität mit der Schwarz/Weiß-Norm ergibt sich, daß der Bildträger des Farbfernsehsenders mit dem gleichen Signal moduliert werden muß, das eine Schwarz/Weiß-Kamera liefern würde. Diese Signalkomponente entspricht dabei der Leuchtdichte des aufgenommenen Bildes. Die zusätzlich benötigten beiden

unabhängigen Farbartsignale müssen dann die noch fehlenden Informationen für die Sättigung und den Farbton enthalten, damit ein beliebiger Farbpunkt im Farbdreieck exakt definiert ist und im Empfänger entsprechend wiedergegeben werden kann. Für diese beiden zusätzlichen Farbinformationen wählt man einen Farbträger, der an der oberen Video-Bandgrenze des Übertragungskanals liegt und den man in einer sogenannten Zweiphasenmodulation mit diesen beiden Signalkomponenten moduliert. Durch die Zweiphasenmodulation stehen beide Signale senkrecht aufeinander, wodurch eine gegenseitige Beeinflussung verhindert wird. Die Auswahl der beiden Signalkomponenten wird dabei so vorgenommen, daß einmal eine Komponente im Bereich der geringsten Farbempfindlichkeit, das sogenannte *Q*-Signal, mit 600 kHz Bandbreite übertragen wird, während das *I*-Signal im Gebiet optimaler Farbauflösung für unser Auge liegt und eine Bandbreite von 1,8 MHz umfaßt. Für die HF-Übertragung wird der Farbträger im Sender unterdrückt und nicht mitausgestrahlt, damit die mögliche Interferenzstörung im Empfänger auf ein Minimum reduziert wird.

KAPITEL III

LEUCHTDICHTE- UND FARBARTSIGNAL

Übersicht

Durch die Festlegung der Leuchtdichtewerte für die drei Primärspannungen erhält man das Modulationssignal für den Bildträger. Sowohl für die drei Primärfarben als auch für die entsprechenden Komplementärfarben wird der Verlauf der Bildträgerspannung nach der Modulation mit diesen Größen dargestellt. Neben diesem Leuchtdichtesignal wird als zusätzliche Farbinformation die Farbartspannung als vektorielle Summe der Farbdifferenzspannungen näher erläutert. Die beiden Farbdifferenzsignale sind dabei so ausgewählt, daß sie bei Schwarz/Weiß-Übertragungen Null werden. Die Farbdifferenzsignale enthalten also nur die typischen Informationen für die Farbübertragung, nämlich die Sättigung und den Farbton. Da das Farbartsignal, zum Leuchtdichtesignal addiert, bei der Modulation des Bildträgers eine Modulationsamplitude ergibt, die sowohl über den Schwarzpegel hinaus, als auch unterhalb des Weißpegels reichen würde, muß eine Reduzierung der Farbartspannung bei der Farbträgermodulation vorgenommen werden. Eine Begrenzung dieser Übermodulation auf 33%, bezogen auf den Weiß- bzw. Schwarzpegel, ist in der Praxis noch zulässig, wodurch sich für die Farbdifferenzsignale entsprechend reduzierte Amplitudenwerte ergeben.

Diese reduzierten Amplituden legen in einem rechtwinkligen Achsenkreuz, entsprechend der später erfolgenden Zweiphasenmodulation, für die drei Primärfarben die elektrischen Werte, d.h. die Spannungsamplituden und die relative Phasenlage, fest. Neben den beiden für die Modulation des Farbträgers benötigten Achsen der Farbdifferenzsignale (U_R — U_Y) und (U_B — U_Y) wird auch die Lage der Farbdifferenzspannung (U_G — U_Y) im Achsenkreuz eingetragen, da die Kenntnis dieser Spannung für die spätere Gleichrichtung im Empfänger wichtig ist. Es wird erklärt, weshalb in der Farbfernsehnorm nicht die Farbdifferenzsignale zur Modulation herangezogen, sondern zwei Signale benutzt werden, die gegenüber diesen Spannungen elektrisch um 33° versetzt sind. Bezeichnet werden diese beiden Farbartspannungen als *I*- und *Q*-Signale. Maßgebend für die Wahl dieser beiden Spannungen ist die unterschiedliche Augenempfindlichkeit für verschiedene Farbzusammensetzungen, wodurch man eine optimalere Ausnutzung der Farbfernsehnorm erreichen kann.

III. 1. Leuchtdichtesignal als Modulation des Bildträgers

Damit die Kompatibilitätsforderungen erfüllt werden, muß die Zusammensetzung des Leuchtdichtesignals für die Modulation des Bildträgers so erfolgen, daß die von den drei Farbaufnahmeröhren abgegebene Kameraspannung der Spannung entspricht, die eine Schwarz/Weiß-Kamera vom gleichen Bildeindruck erzeugen würde.

Für eine weiße Bildvorlage hatten wir bereits gesehen, daß die drei Ausgangssignale der Farbaufnahmeröhren Rot, Grün und Blau gleich groß sind und amplitudenmäßig 100% entsprechen. Eine Schwarz/Weiß-Kamera würde für diese weiße Bildvorlage die gleiche. Spannung, also auch 100%, abgeben. Wenn wir die von den drei Farbaufnahmeröhren gelieferte Spannung mit 100 bezeichnen, so muß das Leuchtdichtesignal für diese drei Ausgangsspannungen gleichfalls 100 sein. Unter dieser Voraussetzung ergeben sich relative Leuchtdichtewerte für die drei Grundfarben Rot, Grün und Blau, die sich wie 30 zu 59 zu 11 verhalten. Dies bedeutet, daß bei einer roten Bildvorlage die rote Kamera eine Spannung 100 abgibt, während eine Schwarz/Weiß-Kamera für diese rote Farbe als Leuchtdichtesignal eine Spannungsamplitude 30 liefert. Genauso verhält es sich bei der grünen und blauen Primärfarbe, wo von der Schwarz/Weiß-Kamera die entsprechenden Leuchtdichtewerte 59 bzw. 11 geliefert werden.

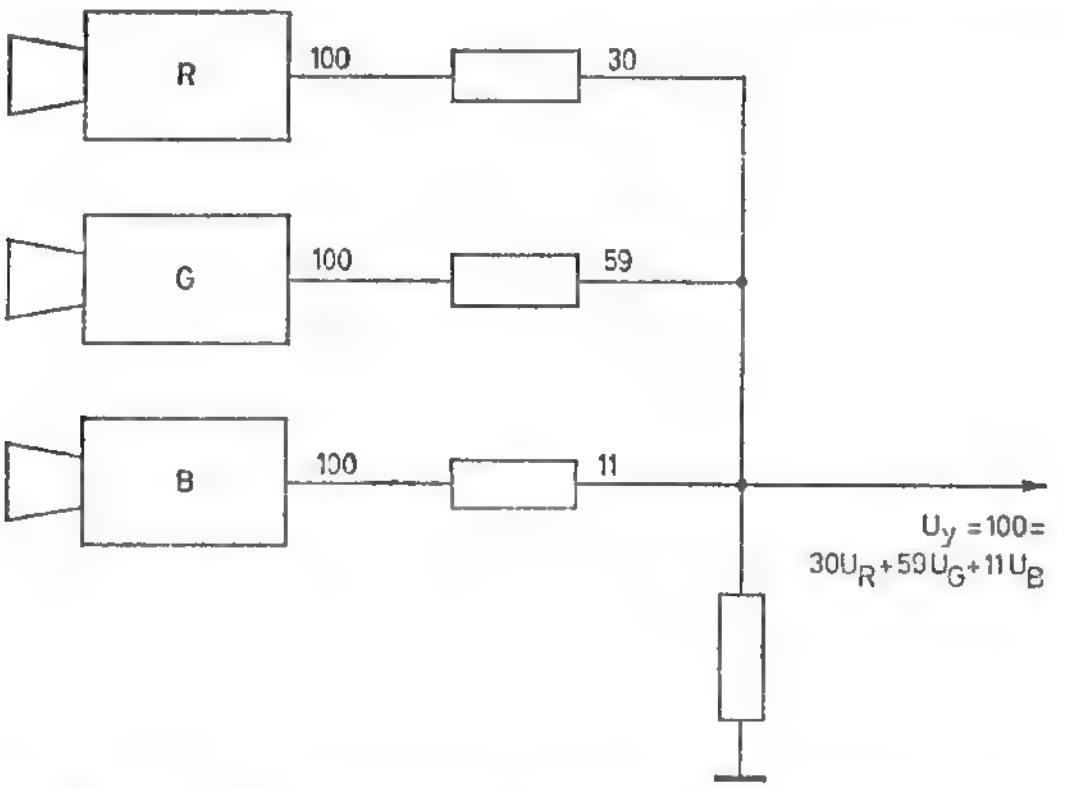


Abb. III. 1. 1. Zusammensetzung des Leuchtdichtesignals.

Von den drei Kameraspannungen ausgehend, lassen sich die richtigen Amplitudenwerte für das Leuchtdichtesignal durch einfache ohmsche Spannungsteiler, wie in Abb. III. 1. 1. angedeutet, einstellen. Wir können also festhalten, daß das Leuchtdichtesignal, welches für die Modulation des

Bildträgers benötigt wird, sich so zusammensetzt, daß diese Spannung aus:

$$U_Y = 0{,}30\, U_R + 0{,}59\, U_G + 0{,}11\, U_B$$

besteht. Diese Festlegung des Leuchtdichtesignals ist die grundlegende Voraussetzung für alle später auftauchenden Umformungen für die Farbartspannungen und bildet die Basis aller im Empfänger vorgenommenen Maßnahmen zur Wiedergewinnung der drei Primärfarben Rot, Grün und Blau.

In Abb. III. 1. 2. ist entsprechend der Kompatibilitätsforderung die Leuchtdichtespannung des Bildträgers noch einmal dargestellt. Man erkennt, daß das Ausgangssignal der Farbkamera als Leuchtdichtewert die gleiche Amplitude besitzt, wie das Ausgangssignal der Schwarz/Weiß-Kamera.

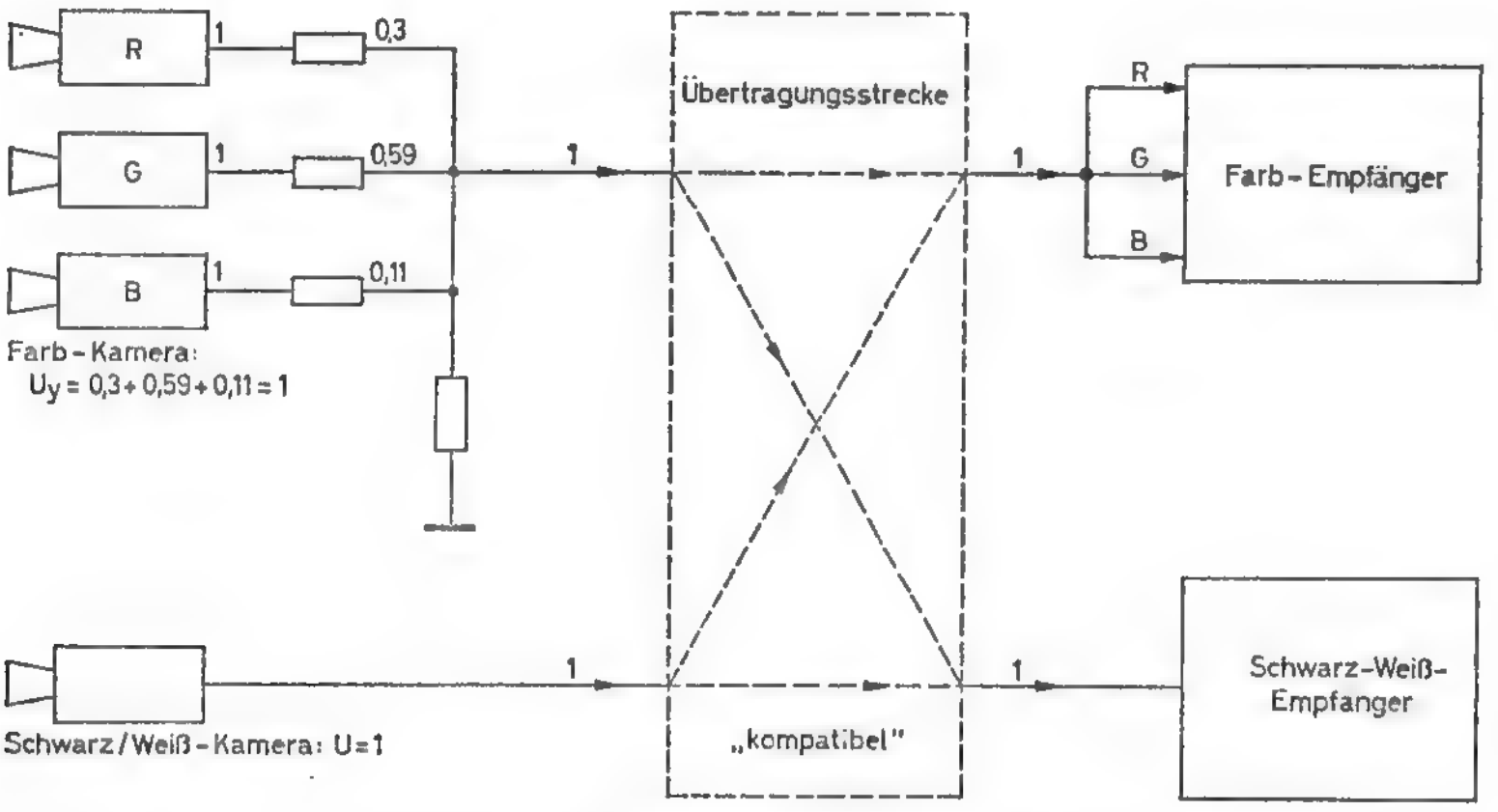


Abb. III. 1. 2. Leuchtdichtesignal bei Schwarz/Weiß- und Farbsendungen.

Dadurch ist es also möglich, daß z.B. mit dem Leuchtdichtesignal der Farbkamera sowohl ein Farbempfänger, als auch ein Schwarz/Weiß-Empfänger angesteuert werden kann und beide Empfänger das gleiche Signal als Schwarz/Weiß-Bild wiedergeben. Umgekehrt kann auch von der Schwarz/Weiß-Kamera der Farbempfänger angesteuert werden, wobei dieser wiederum ein Schwarz/Weiß-Bild wie vorher liefert.

Da mit der Übertragung der Leuchtdichte als Bildträgermodulation die relativen Amplituden aller Farbspannungen festgelegt sind, sollen die Spannungsamplituden der drei Farbaufnahmeröhren sowohl für Weiß, als auch für die drei Primärfarben nochmals getrennt angegeben werden. Ist eine weiße Bildvorlage vorhanden, so liefert jede der drei Farbaufnahme-

röhren die Spannung 100, die wir als prozentuale Angabe für die maximale Ausgangsspannung festlegen wollen. Es ist die gleiche Spannung, die auch eine Schwarz/Weiß-Kamera abgeben würde. Bei einer roten Bildvorlage, entsprechend der festgelegten Primärfarbe, gibt die rote Aufnahmeröhre eine Spannung 100 ab, während die grüne und blaue Aufnahmeröhre keine Spannung liefert. Die Schwarz/Weiß-Kamera würde bei der roten Bildvorlage die Spannung 30 abgeben, womit die entsprechende Leuchtdichteamplitude für das Leuchtdichtesignal als Modulationsamplitude des Bildträgers definiert ist. Bei einer grünen bzw. blauen Bildvorlage, entsprechend den beiden Primärfarben, liefert die jeweilige Aufnahmeröhre wiederum den Ausgangswert 100, während die beiden anderen Aufnahmeröhren keine Spannung abgeben. Der Leuchtdichteanteil, der von einer Schwarz/Weiß-Kamera geliefert würde, beträgt in diesen beiden Fällen für Grün 59 und für Blau 11. Über diese grundsätzlichen Spannungsverhältnisse muß man sich stets im Klaren sein, damit man trotz der verhältnismäßig komplizierten Übertragungstechnik und der nicht einfachen Rückgewinnung der drei Primärfarben im Empfänger jederzeit abschätzen kann, wozu die einzelnen Zwischenphasen im gesamten Übertragungsweg benötigt werden. Mit den Amplitudenwerten des Leuchtdichtesignals für die drei Primärfarben kann man jede beliebige Farbzusammensetzung als Modulationssignal des Bildträgers bestimmen.

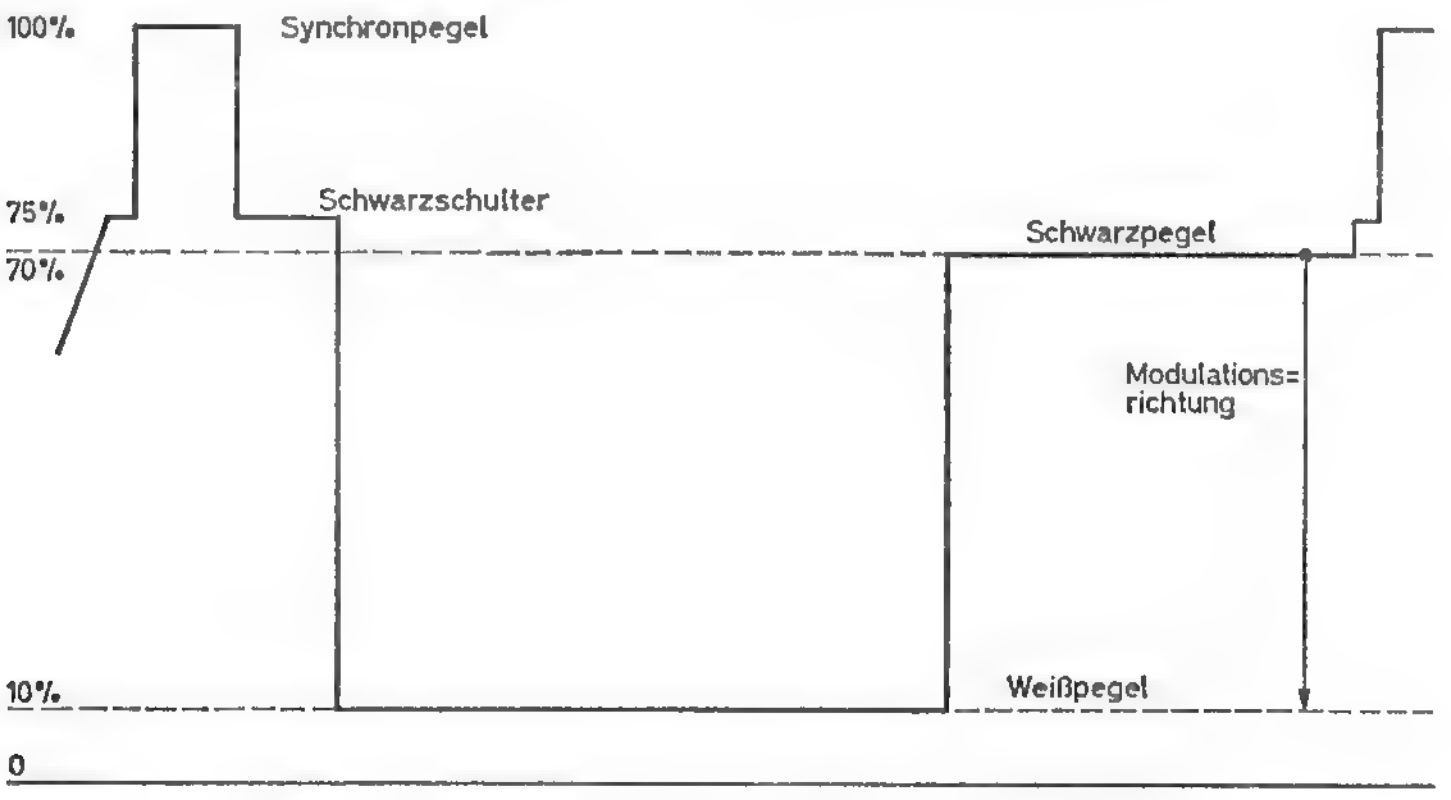


Abb. III. 1. 3. Modulationspegel des Bildträgers.

Um das Modulationssignal eintragen zu können, sind in Abb. III. 1. 3 zunächst die Amplitudenverhältnisse des Bildträgers eingezeichnet. Neben dem Synchronpegel, der 100% der HF-Trägeramplitude des Senders darstellt, ist die Schwarzschulter mit 75% und der Weißpegel mit 10% ein-

getragen, der die Grenze für die höchste Modulationsamplitude des Bildträgers darstellt. Der Schwarzpegel, also die Ausgangsbasis für die Bildträgermodulation, liegt etwas unterhalb der Schwarzschulter, um den Betrag der sogenannten Schwarzabhebung von 5% verschoben. Der Wert des Schwarzpegels liegt damit bei 70%. Diese beiden Pegelgrenzen, d.h. die 70% des Schwarz- und die 10% des Weißpegels, bestimmen den Umfang der gesamten Helligkeitsmodulation für das Schwarz/Weiß-Fernsehen und damit auch den Bereich der Leuchtdichtemodulation beim Farbfernsehen. Entsprechend der benutzten negativen Modulationsrichtung muß also die Modulationsamplitude von Schwarz nach Weiß ansteigen. Wenn wir nur die Modulationsspannung betrachten, können wir also den Schwarzpegel als Ausgangspunkt mit 0 und den Weißpegel mit 100 festlegen.

Dies ist in Abb. III. 1. 4 so gewählt worden. Sowohl für die drei Primärfarben mit deren Komplementärfarben, als auch für die Leuchtdichte Schwarz und Weiß sind die 8 Spannungswerte als Modulationsamplituden in dieser Abbildung aufgeführt. Die Bildvorlage vor der Farbkamera sieht also so aus, daß 8 senkrechte Balken in Zeilenrichtung vorhanden sind, die die Farben Weiß, Gelb, Cyan, Grün, Purpur, Rot, Blau und Schwarz aufweisen. Bei der weißen Bildvorlage ergab sich ein Leuchtdichtesignal:

$$U_Y = 30\,U_R + 59\,U_G + 11\,U_B = 100.$$

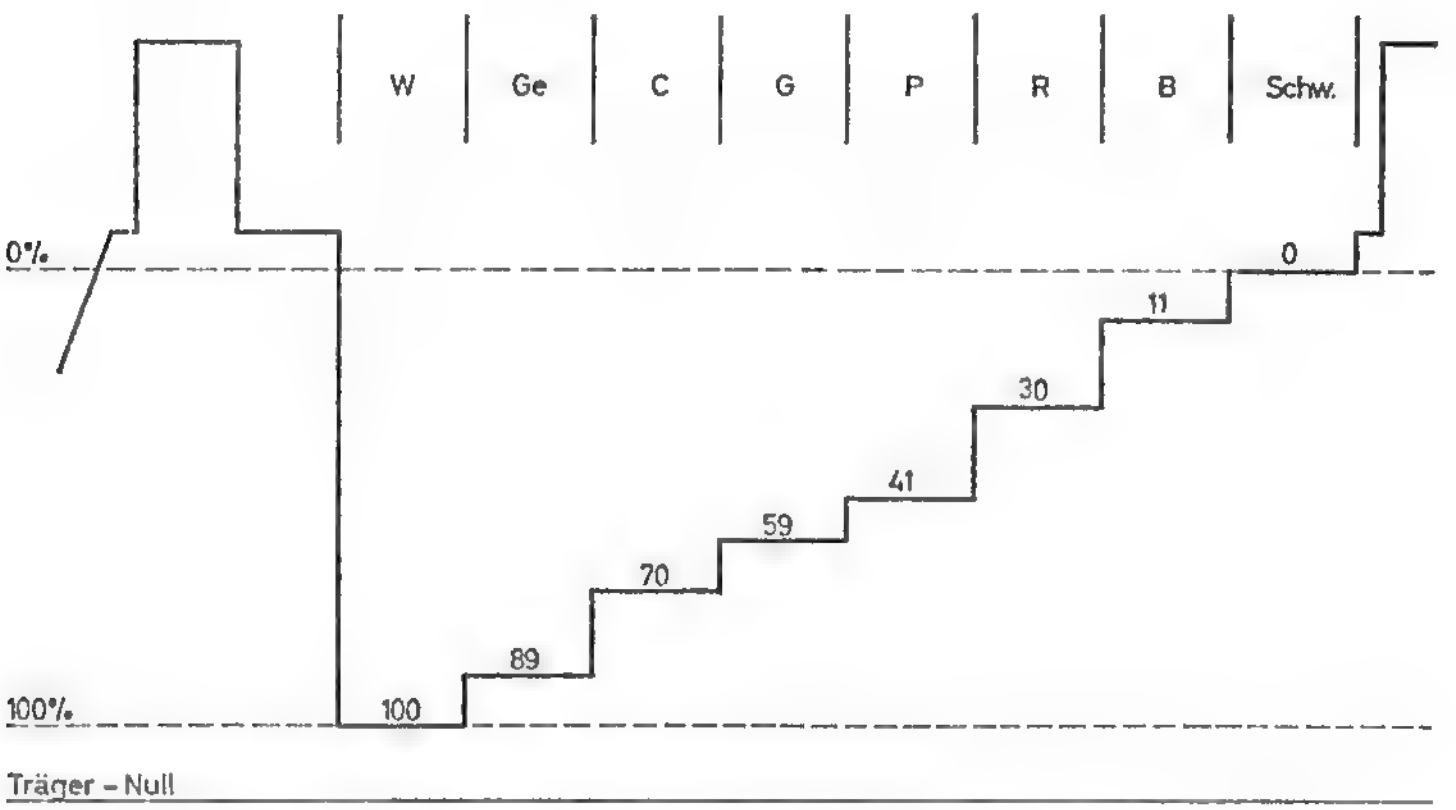


Abb. III. 1. 4. Leuchtdichtesignal als Bildträgerspannung.

Da die gelbe Farbe aus der Mischung von Rot und Grün besteht, ergibt sich eine Leuchtdichteamplitude:

$$U_Y = 30\,U_R + 59\,U_G = 89.$$

Cyan als Mischfarbe besteht aus den beiden Anteilen Grün und Blau, so daß wir erhalten:

$$U_Y = 59\, U_G + 11\, U_B = 70.$$

Die grüne Primärfarbe liefert:

$$U_Y = 59\, U_G = 59.$$

Purpur besteht aus den beiden Anteilen Rot und Blau:

$$U_Y = 30\, U_R + 11\, U_B = 41.$$

Die beiden Primärfarben Rot und Blau liefern je ein Leuchtdichteanteil:

$$U_Y = 30\, U_R = 30 \text{ bzw. } U_Y = 11\, U_B = 11.$$

Bei Schwarz ist die Signalamplitude O, so daß auch das Leuchtdichtesignal die Spannung O liefert. In dieser Reihenfolge haben wir also über eine Zeilenbreite gesehen bei der gewählten Bildvorlage eine treppenförmig ansteigende Spannung, die in 8 Stufen von Weiß = 100 bis Schwarz = 0 läuft. Dies ist die gleiche Spannungsform, die eine Schwarz/Weiß-Kamera als Leuchtdichtesignal, d.h. als Helligkeitseindruck, liefern würde. Zu erkennen ist in dieser Darstellung, daß ein Komplementärfarbenpaar, also Rot und Cyan bzw. Grün und Purpur oder Blau und Gelb, jeweils die Spannung 100 liefert und damit der Farbe „Weiß" entspricht, genauso wie die drei Primärfarben Rot, Grün und Blau zusammengenommen. Die im I. Kapitel im Farbdreieck kennengelernten Beziehungen treten also hier umgewandelt in elektrischen Spannungen in gleichem Maße wieder in Erscheinung.

III. 2. Farbdifferenzsignale

Zur zusätzlichen Übertragung der typischen Eigenschaften einer Farbe, nämlich der Sättigung und des Farbtones, müssen neben dem Leuchtdichtesignal als Bildträgermodulation zwei weitere voneinander unabhängige Signalkomponenten ausgewählt werden. Diese beiden zusätzlichen Signalkomponenten werden als Farbdifferenzsignale bezeichnet und bilden zusammen das sogenannte Farbartsignal. Die Festlegung dieser beiden Farbdifferenzsignale wird so vorgenommen, daß man sowohl von der roten Farbspannung U_R, als auch von der blauen Farbspannung U_B das Leuchtdichtesignal U_Y abzieht. Damit haben diese beiden Signalkomponenten die Form $U_R - U_Y$ und $U_B - U_Y$. Aus dem Leuchtdichtesignal U_Y mit seinen Einzelkomponenten für die Farben Rot, Grün und Blau lassen sich

die Amplitudenanteile der beiden Farbdifferenzsignale bestimmen. Es ergibt sich:

$$\begin{aligned} U_R - U_Y &= 1{,}00\,U_R - 0{,}30\,U_R - 0{,}59\,U_G - 0{,}11\,U_B \\ &= 0{,}70\,U_R - 0{,}59\,U_G - 0{,}11\,U_B \\ U_B - U_Y &= 1{,}00\,U_B - 0{,}30\,U_R - 0{,}59\,U_G - 0{,}11\,U_B \\ &= -0{,}30\,U_R - 0{,}59\,U_G + 0{,}89\,U_B \end{aligned}$$

Betrachtet man diese beiden Farbdifferenzsignale für den Lichteindruck Weiß, dann sieht man, daß sowohl $U_R - U_Y$, als auch $U_B - U_Y$ Null wird. Die beiden Farbdifferenzsignale, die zur zusätzlichen Modulation des Farbträgers herangezogen werden, sind also nur vorhanden, wenn bei einer Farbübertragung neben der Leuchtdichte auch der Farbton und die Sättigung eine Rolle spielt.

Da damit alle drei Übertragungskomponenten zur Definition eines beliebigen Farbpunktes in elektrischer Form vorliegen, nämlich das Leuchtdichtesignal U_Y und die beiden Farbdifferenzspannungen $U_R - U_Y$ und $U_B - U_Y$, kann videomäßig hinter der Farbkamera die Umformung der Kameraspannungen, die für diese drei Signalauszüge erforderlich sind, dargestellt werden.

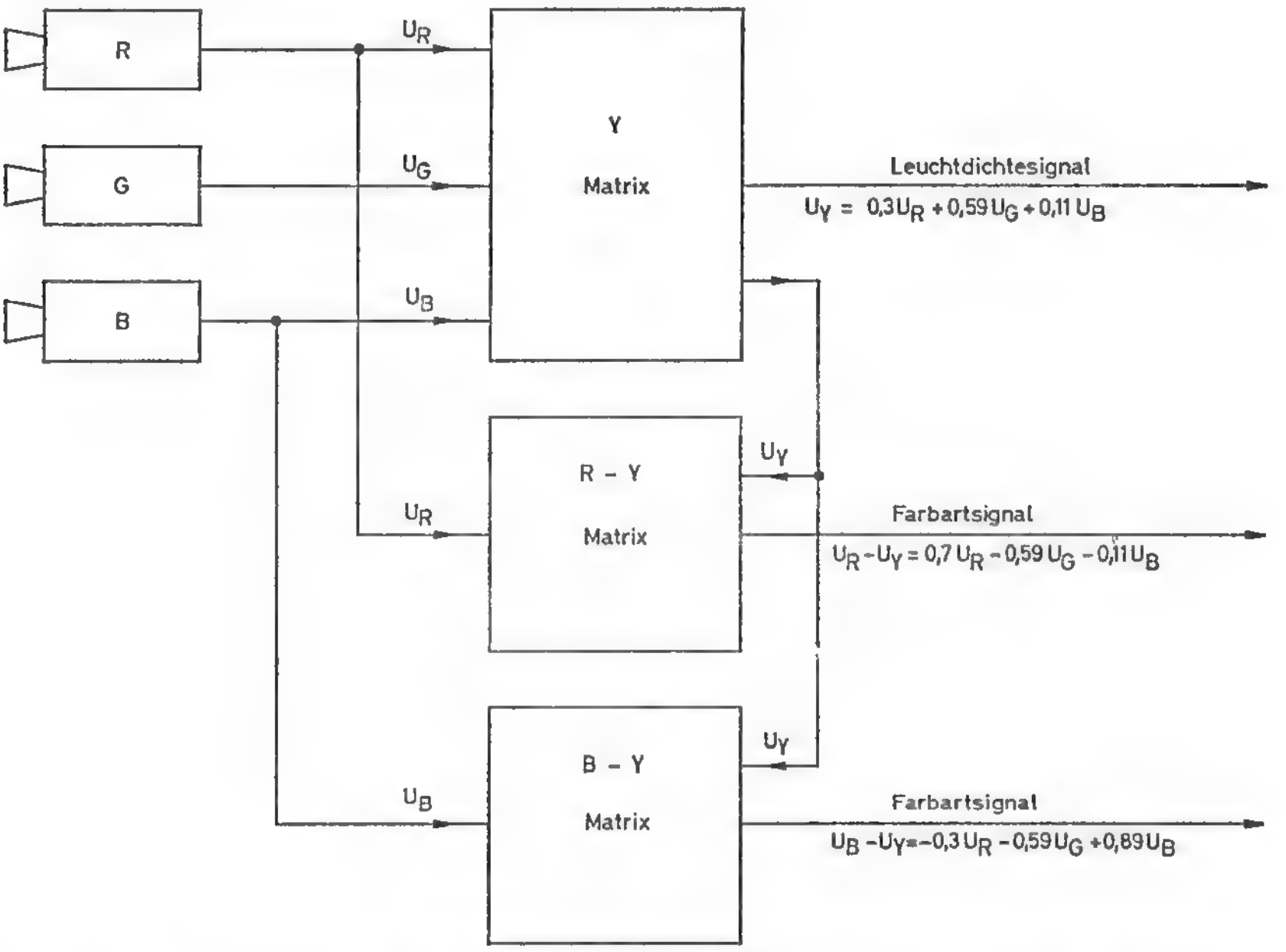


Abb. III. 2. 1. Umformung der Kameraspannungen in Leuchtdichte- und Farbartsignal.

Wir erkennen in Abb. III. 2. 1., daß die drei Kameraausgangssignale U_R, U_B und U_G drei sogenannten Matrixeinheiten zugeführt werden. Diese Matrixeinheiten, die in analoger Weise auch später im Empfänger wieder auftauchen werden, stellen nichts anderen dar, als lineare Umformungsglieder, die mit Hilfe von Spannungsteilern und evtl. Röhren, falls gegenpolige Spannungen benötigt werden, die erforderlichen Signalamplituden liefern. Die Y-Matrix liefert dabei das Leuchtdichtesignal U_Y mit den Teilkomponenten 0,30 U_R + 0,59 U_G + 0,11 U_B. Die (R — Y)-Matrix liefert das Farbdifferenzsignal mit den Werten U_R — U_Y = 0,70 U_R — 0,59 U_G — 0,11 U_B und in analoger Weise die (B — Y)-Matrix die Werte U_B — U_Y = — 0,30 U_R — 0,59 U_G + 0,89 U_B. In allen drei Fällen wird zunächst mit einfachen ohmschen Spannungsteilern aus der Kameraspannung das relative Amplitudenverhältnis eingestellt und dann für die eventuelle gegenpolige Spannung eine Röhre zur Phasendrehung benutzt. Um die Zusammenhänge besser zu übersehen, wird bereits jetzt gezeigt, in welcher Weise man später aus den umgeformten Kameraspannungen, nämlich dem Leuchtdichte- und den beiden Farbdifferenzsignalen, im Empfänger die Zusammensetzung und Gewinnung der drei Primärfarben vornehmen kann. In Abb. III. 2. 2. ist eine derartige Möglichkeit angedeutet.

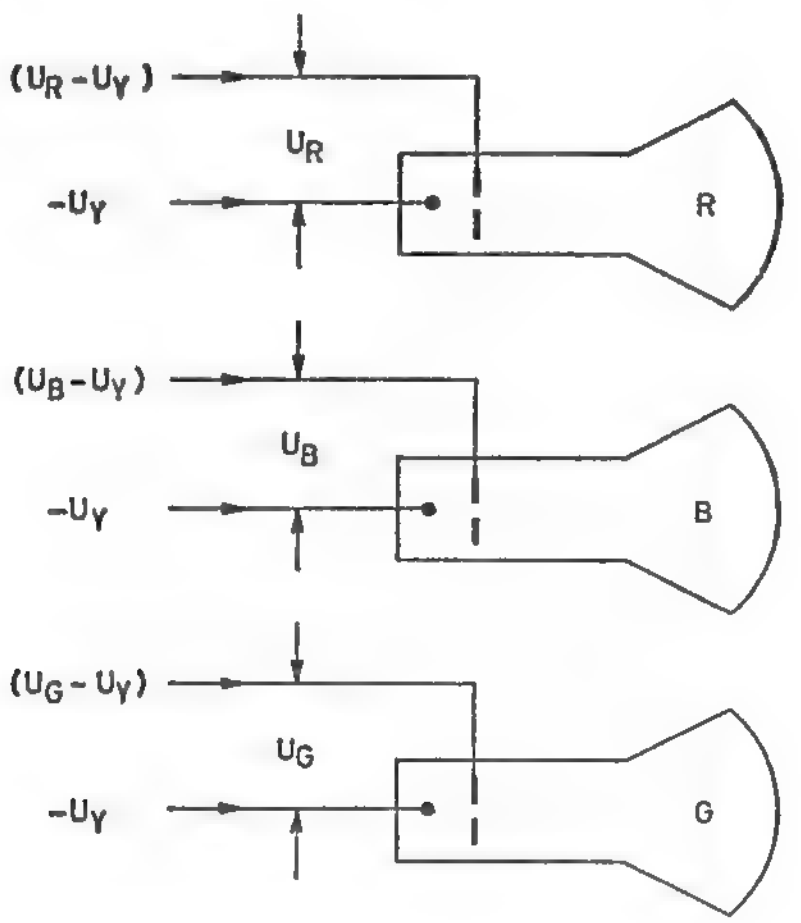


Abb. III. 2. 2. Bildung der Primäfarbspannungen aus Leuchtdichte- und Farbdifferenzspannungen.

Drei Wiedergaberöhren, die jeweils die rote, grüne und blaue Farbkomponente liefern, erhalten an der Katode als Ansteuerspannung das Leuchtdichtesignal U_Y. An den Steuergittern der drei Wiedergaberöhren liegt jeweils eine Farbdifferenzspannung, nämlich U_R — U_Y bzw. U_B — U_Y und für die grüne Röhre das Signal U_G — U_Y. Die Steuerspannung an

jeder Röhre ist dann die Differenz aus Katoden- und Gitterspannung, nämlich U_R, U_B bzw. U_G. Das Leuchtdichtesignal U_Y steht als Bildträgermodulation direkt zur Verfügung, gleichfalls die beiden Farbdifferenzspannungen $U_B - U_Y$ und $U_R - U_Y$. Die dritte erforderliche Komponente im Empfänger, nämlich $U_G - U_Y$, kann, wie wir später sehen werden, in einfacher Weise aus den beiden Farbdifferenzspannungen $U_R - U_Y$ und $U_B - U_Y$ gewonnen werden.

Um die beiden Farbdifferenzspannungen mit dem Farbträger übertragen zu können, muß man eine hierfür geeignete Übertragungstechnik wählen. Da es sich um zwei voneinander unabhängige Modulationsspannungen, die gleichzeitig mit einem Träger übertragen werden müssen ohne daß eine gegenseitige Beeinflussung stattfindet, handelt, muß man die sogenannte Zweiphasenmodulation anwenden. Ohne uns bereits jetzt mit dieser Modulationstechnik näher zu beschäftigen, wollen wir nur festhalten, daß hierbei beide Modulationsspannungen so auf den Träger aufmoduliert werden, daß sie rechtwinklig aufeinander stehen. Als vektorielle Größen können wir also die beiden Farbdifferenzspannungen in einem Achsenkreuz, wie in Abb. III. 2. 3. eingetragen, darstellen.

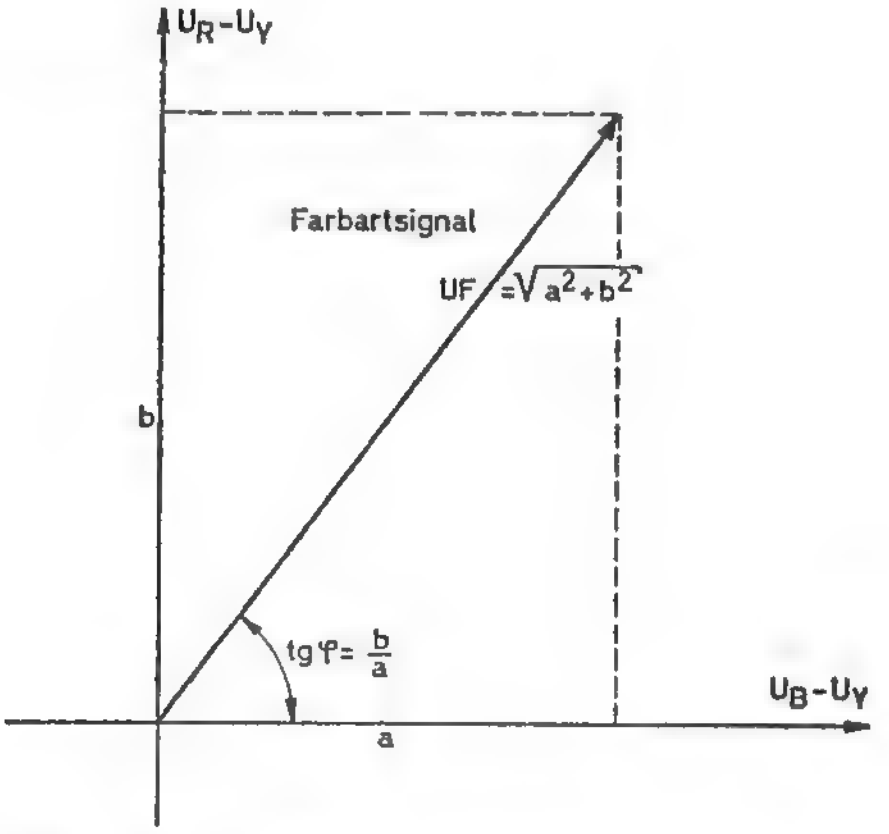


Abb. III. 2. 3. Farbartsignal als vektorielle Summe der Farbdifferenzsignale.

Aus beiden Farbdifferenzsignalen $U_R - U_Y$ und $U_B - U_Y$ bildet sich, vektoriell addiert, die Farbartspannung U_F, die als resultierende Modulationsspannung des Farbträgers auftritt und anschließend HF-mäßig übertragen wird. Aus dieser rechtwinkligen Darstellung geht hervor, daß die Amplitude der Farbartspannung U_F aus der Wurzel der beiden Quadrate der Farbdifferenzspannungen gebildet wird und sich je nach dem Ampli-

tudenverhältnis beider Farbdifferenzspannungen ein bestimmter Phasenwinkel einstellt. Hieraus ergibt sich, daß zwei elektrische Größen für das Farbartsignal U_F definiert werden können, nämlich einmal die Amplitude und zum anderen der Phasenwinkel. Bei der Behandlung der Zweiphasenmodulation im nachfolgenden Kapitel V werden wir dann noch sehen, daß die Amplitude der Farbartspannung U_F eine Aussage über die Sättigung der zu übertragenden Farbe macht und der Phasenwinkel φ ein Maß für den Farbton darstellt. Mit Hilfe der beiden Farbdifferenzspannungen $U_R - U_Y$ und $U_B - U_Y$ wird also nach der vektoriellen Addition über das Farbartsignal U_F die Sättigung und der Farbton als Modulationsspannung übertragen, so daß zusammen mit der Leuchtdichte als Modulationsamplitude des Bildträgers die drei Kenngrößen zur Definition jedes beliebigen Farbpunktes zur Verfügung stehen.

Um das Farbartsignal etwas näher kennenzulernen, wollen wir für die drei Primärfarben Rot, Grün und Blau die jeweiligen Amplitudenwerte bestimmen. Die Amplitude des Farbartsignals U_F erhält man, rechtwinklig addiert, aus den Farbdifferenzspannungen $U_R - U_Y$ und $U_B - U_Y$:

$$U_F = \sqrt{(U_B - U_Y)^2 + (U_R - U_Y)^2}.$$

Für die grüne Farbe liefern uns die Farbdifferenzsignale $U_B - U_Y$ den Amplitudenwert $-0{,}59$ und $U_R - U_Y$ gleichfalls $-0{,}59$. Damit wird die Amplitude der Farbartspannung bei grüner Bildvorlage:

$$U_F = \sqrt{(-0{,}59)^2 + (-0{,}59)^2} = \pm 0{,}83.$$

Dies bedeutet, daß das Farbartsignal bei vorhandener grüner Farbe eine Modulationsamplitude von $\pm$ 0,83 besitzt, d.h. symmetrisch zur Null-Linie $\pm$ 83% der insgesamt zur Verfügung stehenden maximalen Modulationsamplitude einnimmt. Diese maximale Modulationsamplitude, bezogen auf den Bildträger, entspricht dem zur Verfügung stehenden Abstand zwischen dem Weiß- und Schwarz-Pegel. Da das Farbartsignal zusätzlich zum Leuchtdichtesignal des Bildträgers addiert und mitausgestrahlt wird, bildet die Bezugslinie des Leuchtdichtesignals die Modulations-Null-Linie für das Farbartsignal. Für unsere grüne Spannung können wir also zu der Leuchtdichteamplitude 0,59 die Farbartamplitude mit $\pm$ 0,83 addieren.

Aus Abb. III. 2. 4. ersehen wir, daß sowohl in Richtung auf den Weiß-Pegel, als auch zum Schwarz-Pegel hin, beide Grenzen des normalen Modulationsbereiches hierbei überschritten werden. Es findet also eine Übermodulation statt.

Bei der Übertragung der roten Farbe liefert das Farbdifferenzsignal $U_B - U_Y$ den Amplitudenwert $-0{,}30$, während die Farbdifferenzspan-

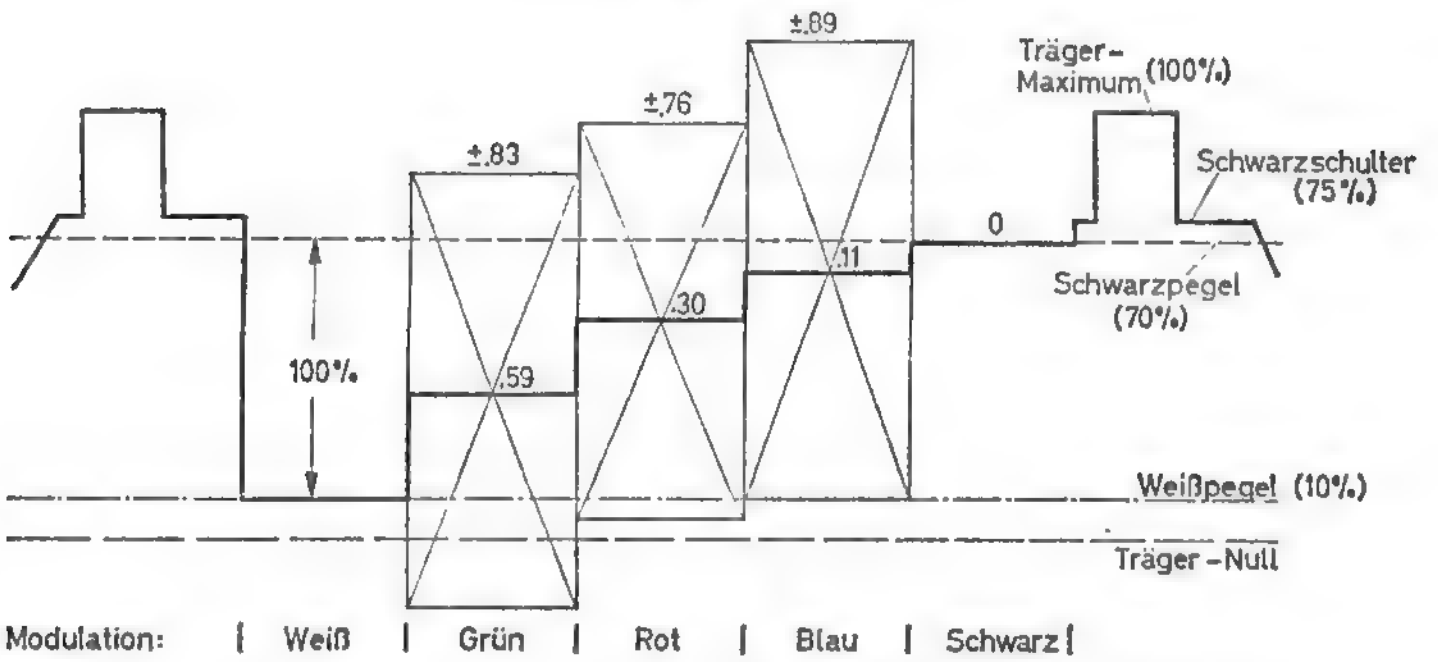


Abb. III. 2. 4. Unreduzierte Farbartmodulationsamplituden.

nung $U_R - U_Y$ einen Wert von + 0,70 ergibt. Damit erhält man eine Amplitude der Farbartspannung:

$$U_F = \sqrt{(-0{,}30)^2 + (0{,}70)^2} = \pm 0{,}76.$$

Dieser Amplitudenwert für die Farbartspannung Rot ergibt zum Leuchtdichtewert von 0,30 addiert gleichfalls eine Überschreitung sowohl des Weiß- als auch des Schwarz-Pegels. Für die blaue Farbe erhalten wir eine Farbartspannung, die sich aus der Farbdifferenzspannung für $U_B - U_Y = 0{,}89$ und $U_R - U_Y = -0{,}11$ mit folgendem Wert einstellt:

$$U_F = \sqrt{(0{,}89)^2 + (-0{,}11)^2} = \pm 0{,}89.$$

Addieren wir für Blau zum Leuchtdichtewert 0,11 die Amplituden ± 0,89 so sehen wir, daß in diesem Fall oberhalb des Schwarz-Pegels die größte Übermodulation stattfindet. Da eine Übermodulation, die den Weiß-Pegel so stark überschreitet, daß die Null-Linie der Trägerspannung erreicht wird, gar nicht mehr übertragen werden kann, muß eine gewisse Reduzierung der Modulationsamplituden und damit der Farbdifferenzspannungen vorgenommen werden. Diese Reduzierung darf jedoch nicht so weit getrieben werden, daß ein zu ungünstiges Signal/Rauschverhältnis und damit eine Benachteiligung bei der HF-mäßigen Übertragung für das Farbartsignal auftritt. Um hier den günstigsten Kompromiß zu finden, hat man in Amerika vor der Festlegung der Farbfernsehnorm umfangreiche Ausbreitungsversuche durchgeführt. Als günstigster Wert hat sich dabei herausgestellt, daß eine Begrenzung der maximal möglichen Übermodulation auf 33% oberhalb des Schwarz-Pegels gewählt werden kann. Von der Begrenzung der Übermodulation auf 33% ausgehend, muß man dann die erforderlich werdende Reduzierung der beiden Farbdifferenzspannungen bestimmen.

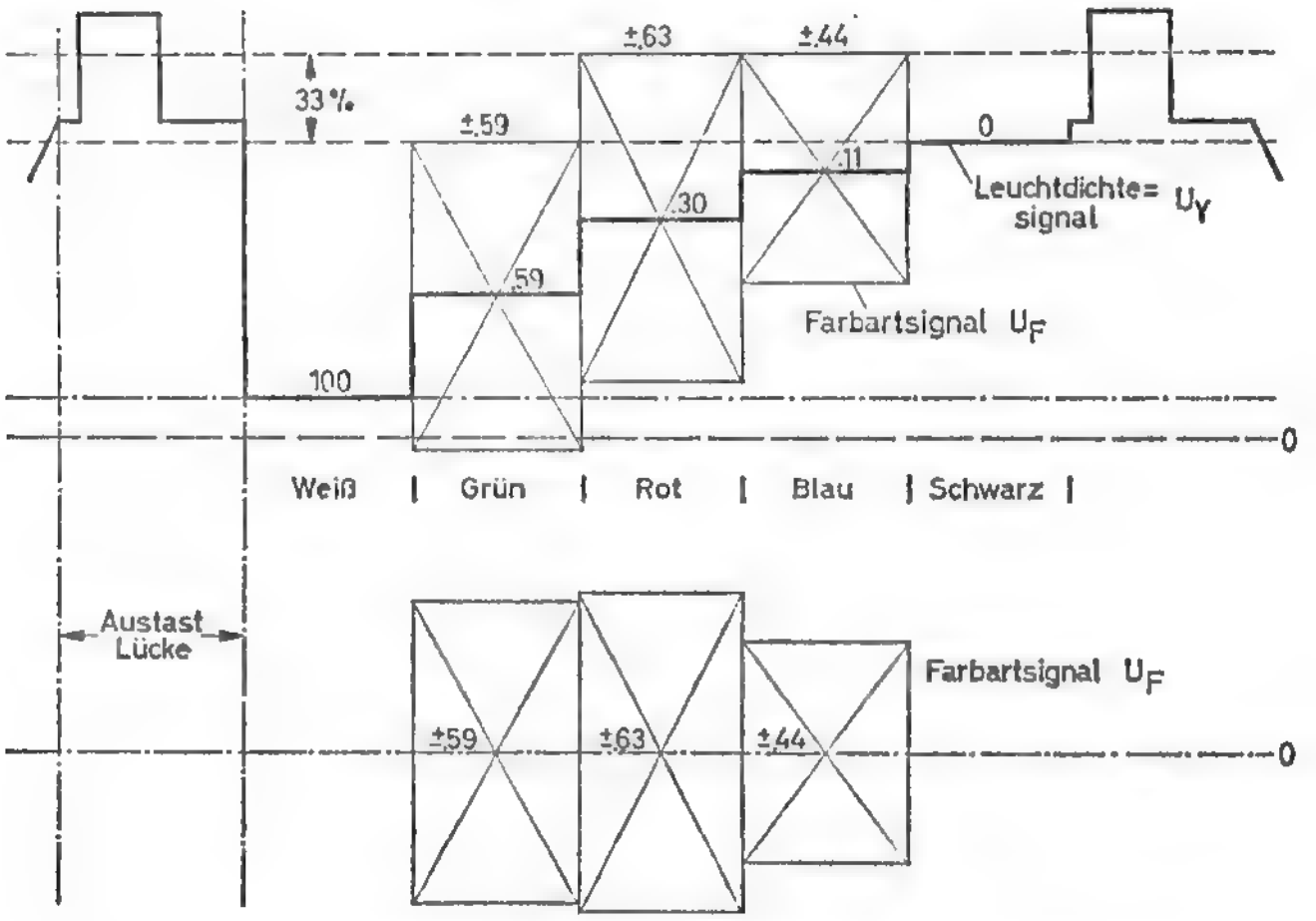


Abb. III. 2. 5. Reduzierte Farbartmodulationsamplituden.

Hierzu entnehmen wir aus Abb. III. 2. 5., daß das Farbartsignal U_F für die rote Farbe nur noch eine Amplitude von $\pm$ 0,63 haben darf und bei der blauen Farbe die Amplitude auf $\pm$ 0,44 begrenzt werden muß. Wir legen zunächst fest, daß die Farbdifferenzspannung $U_B - U_Y$ um den Faktor a und die Farbdifferenzspannung $U_R - U_Y$ um den Faktor b reduziert werden muß. Man kann also schreiben:

$$(U_B - U_Y) \cdot a = (U_B - U_Y)' \text{ und } (U_R - U_Y) \cdot b = (U_R - U_Y)'$$

Für die rote Farbe erhalten wir hiermit:

$$U_F = \pm\, 0{,}63 = \sqrt{(-\,0{,}30a)^2 + (0{,}70b)^2}.$$

Für Blau ergibt sich:

$$U_F = \pm\, 0{,}44 = \sqrt{(0{,}89a)^2 + (-\,0{,}11b)^2}.$$

Löst man diese beiden Gleichungen nach a und b auf, so erhält man $a = 0{,}49$ und $b = 0{,}88$. Es muß also die Farbdifferenzspannung $U_B - U_Y$ mit dem Faktor 0,49 multipliziert werden und die Spannung $U_R - U_Y$ mit dem Faktor 0,88. Entsprechend diesen reduzierten Amplitudenwerten ergibt sich:

$$(U_B - U_Y)' = -\,0{,}15\, U_R - 0{,}29\, U_G + 0{,}44\, U_B$$

$$(U_R - U_Y)' = \quad 0{,}62\, U_R - 0{,}52\, U_G - 0{,}10\, U_B.$$

Auch hier erkennen wir, daß beide reduzierten Farbdifferenzspannungen

für die Übertragung von Weiß den Amplitudenwert Null annehmen, genau wie vorher die unreduzierten Amplitudenwerte. Aus diesen reduzierten Farbdifferenzspannungen können wir jetzt die endgültigen Werte der Farbartspannung U_F bestimmen. Für die rote Farbe ergibt sich dabei:

$$U_F = \sqrt{(-0{,}15)^2 + (0{,}62)^2} = \pm 0{,}63.$$

Bei Grün und Blau erhalten wir:

$$U_F = \sqrt{(-0{,}29)^2 + (-0{,}52)^2} = \pm 0{,}59 \text{ bzw.}$$

$$U_F = \sqrt{(0{,}44)^2 + (-0{,}10)^2} = \pm 0{,}44.$$

Diese reduzierten Werte der Farbartspannung U_F als Modulationsamplituden zum Leuchtdichtesignal des Bildträgers addiert, ergeben die Werte der Abb. III. 2. 5. Das Farbartsignal selbst ist in dieser Darstellung nochmals alleine ohne das Leuchtdichtesignal U_Y dargestellt und besteht aus dem Modulationsprodukt des Farbträgers mit seiner Frequenz von 4,43 MHz.

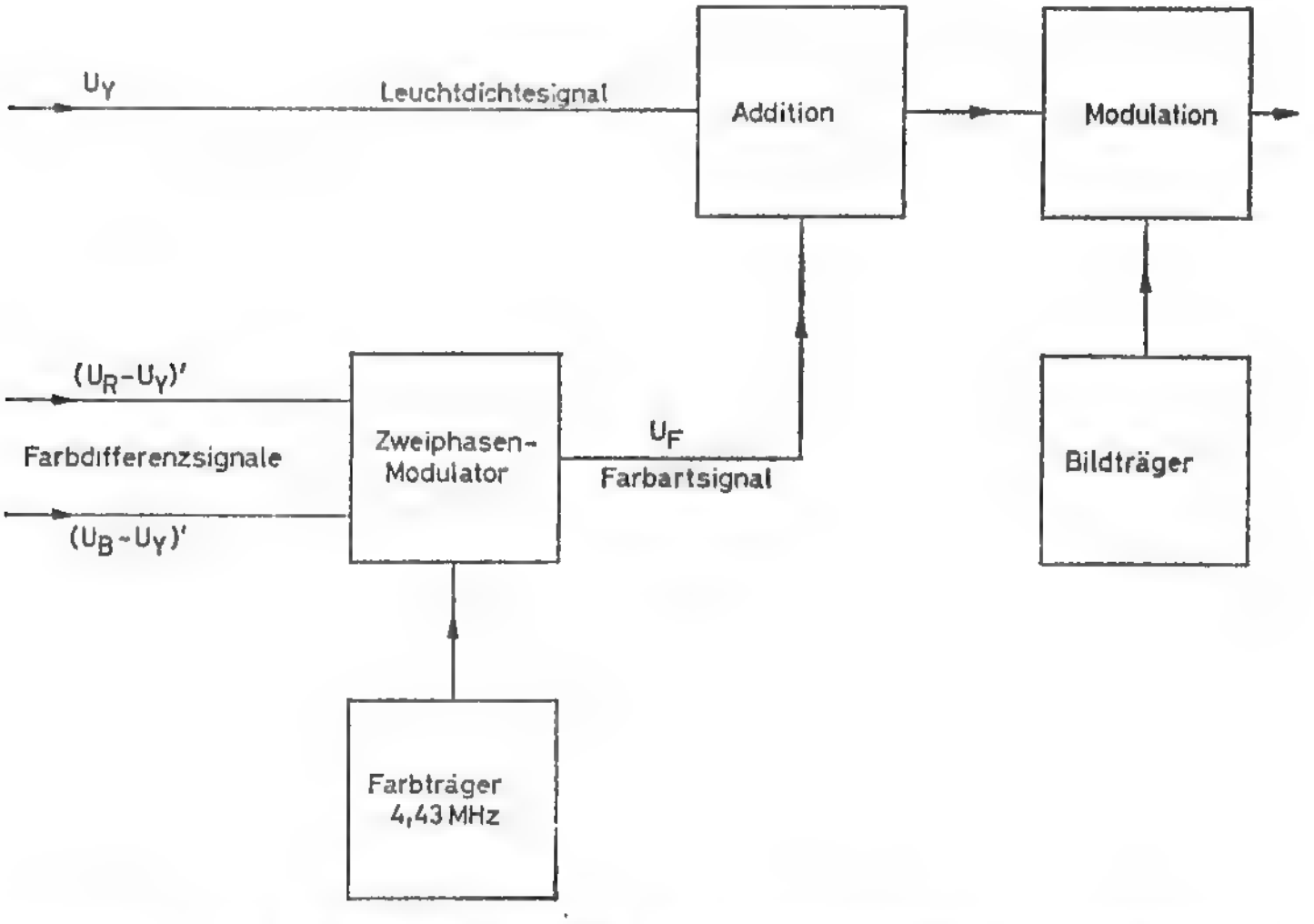


Abb. III. 2. 6. Modulationsschema für Leuchtdichte- und Farbdifferenzsignale.

Dieser Schwingungszug des Modulationsproduktes von 4,43 MHz ist dem jeweiligen Leuchtdichtesignal U_Y senderseitig überlagert. Der Bildträger des Farbfernsehsenders wird also gleichzeitig mit dem Leuchtdichtesignal und dem Farbartsignal U_F, dessen Grundfrequenz 4,43 MHz ist, moduliert. Dieses Modulationsschema ist in Abb. III. 2. 6. angegeben.

Die Farbdifferenzsignale $(U_R - U_Y)'$ und $(U_B - U_Y)'$ werden in einer Zweiphasenmodulation dem Farbträger von 4,43 MHz aufmoduliert. Das Ausgangssignal als Farbartsignal U_F wird mit dem Leuchtdichtesignal U_Y addiert und dann als zusammengesetztes Modulationssignal dem Bildträger zugeführt.

Nachdem wir jetzt die reduzierten Amplituden der beiden Farbdifferenzspannungen $(U_R - U_Y)'$ und $(U_B - U_Y)'$ kennen, können wir in der rechtwinkligen Darstellung nach Abb. III. 2. 7. die Amplituden und Phasenlagen der drei Primärfarben eintragen. Die Farbe Rot z.B. hat eine Amplitudengröße $(U_B - U_Y)'$ von —0,15 und $(U_R - U_Y)'$ von 0,62. Beide Amplitudenwerte, rechtwinklig addiert, ergeben die Farbartspannung Rot mit 0,63 bei einem Phasenwinkel von 103°, wenn die $(U_B - U_Y)'$-Achse als Null-Linie definiert wird. Bei der grünen Spannung ergibt sich für $(U_B - U_Y)' = -0{,}29$ und für $(U_R - U_Y)' = -0{,}52$, so daß wir als Farbartspannung Grün den Amplitudenwert 0,59 und den Phasenwinkel 241° erhalten. Analog ergibt sich für Blau aus $(U_B - U_Y)' = 0{,}44$ und aus $(U_R - U_Y)' = -0{,}10$ ein Amplitudenwert von 0,44 beim Phasenwinkel von 347°. Damit liegen also die drei Primärfarben nach Amplitude und Phasenwinkel in einer rechtwinkligen Koordinatendarstellung als elektrische Größen für die zu übertragende Farbartspannung fest.

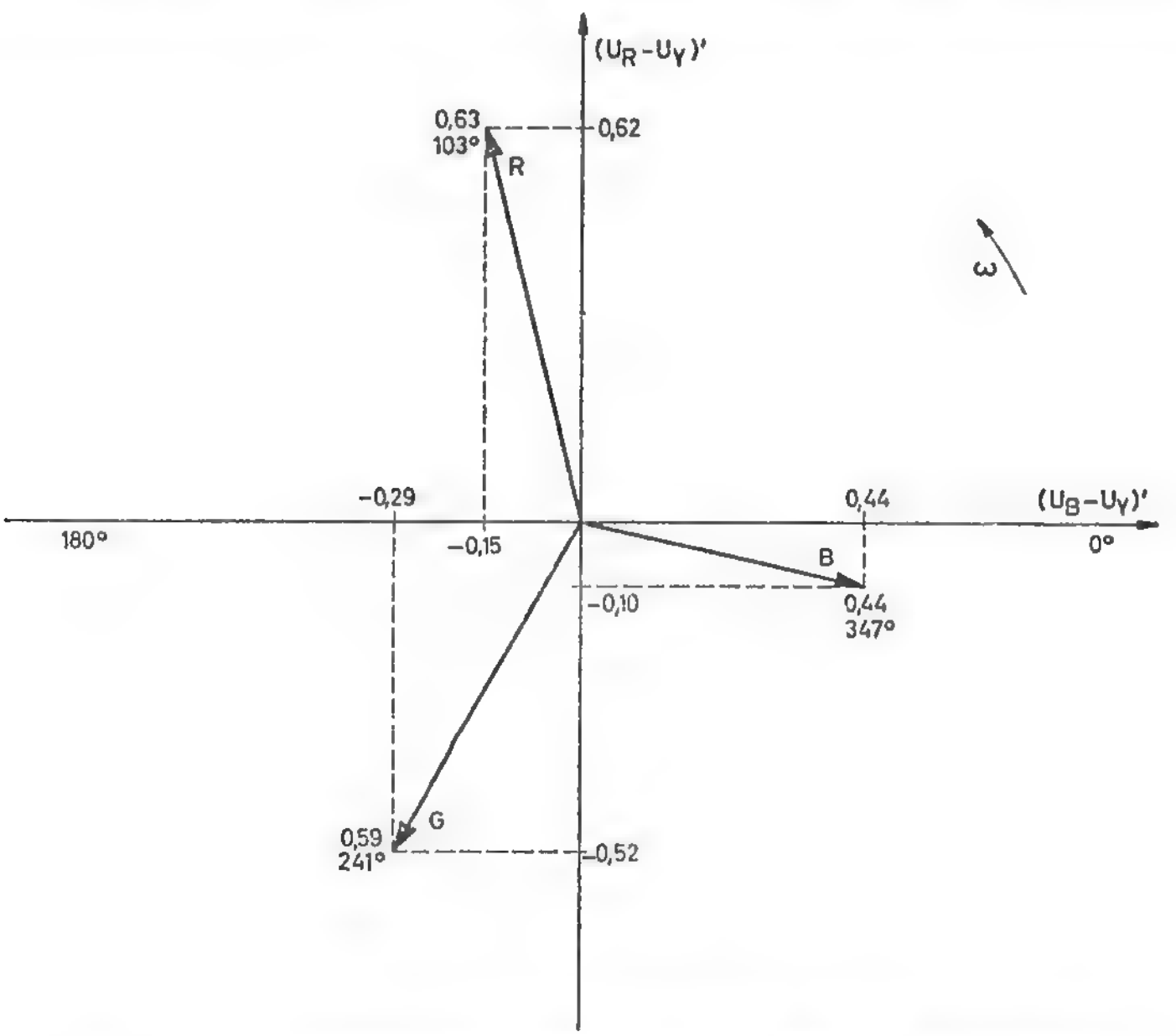


Abb. III. 2. 7. Amplituden- und Phasenlage der Primärfarben.

Wir finden hier also eine ähnliche Darstellungsweise in elektrischen Größen wieder, wie wir es bereits bei den Farben, nach Wellenlängen geordnet, im Farbdreieck kennengelernt hatten. Wichtig ist hierbei zu erkennen, daß die Farben und die Farbdarstellung im Farbdreieck, geordnet nach Wellenlängen entsprechend ihrem optischen Charakter, nur bis zur Umformung dieser Lichtempfindungen in elektrische Spannungen ihre Gültigkeit haben. Am Ausgang der Farbkamera stehen uns für die drei Primärfarben elektrische Spannungsgrößen zur Verfügung, die basierend auf der Zweiphasenmodulation des Farbträgers zu einer Farbartspannung umgeformt werden. Hiernach ergeben sich in einer rechtwinkligen Koordinatendarstellung elektrische Spannungen, die nach Amplitude und Phasenwinkel definiert sind. Alle weiteren Umformungen, sowohl für die Übertragungstechnik des Senders als auch bei der Rückgewinnung der Primärfarben im Empfänger, beziehen sich dann nur noch auf diese elektrischen Spannungswerte.

Wir kennen jetzt neben der elektrischen Darstellung der beiden Farbdifferenzsignale $(U_R - U_Y)'$ und $(U_B - U_Y)'$ auch die Lage der drei Primärfarben, so daß uns zur Vervollständigung dieser Darstellungsweise nur noch die Signalgröße $U_G - U_Y$ fehlt. Dieses dritte Farbdifferenzsignal $U_G - U_Y$ wird vom Sender nicht getrennt ausgestrahlt, da diese Spannung bereits in den beiden zur Modulation benutzten Komponenten $(U_R - U_Y)'$ und $(U_B - U_Y)'$ und dem Leuchtdichtesignal mit enthalten ist. Dies kann man sehr leicht dadurch feststellen, daß man das Leuchtdichtesignal $U_Y = 0{,}30\ U_R + 0{,}59\ U_G + 0{,}11\ U_B$ umformt. Der Wert $U_Y = 1{,}00$ kann gleichfalls in die relativen Amplitudenwerte $0{,}30\ U_Y + 0{,}59\ U_Y + 0{,}11\ U_Y$ zerlegt werden, so daß unsere Ausgangsgleichung, wenn U_Y zur rechten Gleichungsseite herübergenommen wird, folgende Gestalt annimmt:

$$0 = 0{,}30\,(U_R - U_Y) + 0{,}59\,(U_G - U_Y) + 0{,}11\,(U_B - U_Y).$$

Diese Gleichung, nach $U_G - U_Y$ umgestellt, ergibt:

$$U_G - U_Y = -\frac{0{,}30}{0{,}59} \cdot (U_R - U_Y) - \frac{0{,}11}{0{,}59} \cdot (U_B - U_Y).$$

Wird für $U_R - U_Y$ und $U_B - U_Y$ der reduzierte Wert, nämlich $(U_R - U_Y)'$ und $(U_B - U_Y)'$ eingesetzt, so erhält man:

$$(U_G - U_Y) = -\frac{0{,}30}{0{,}59 \cdot 0{,}88} \cdot (U_R - U_Y)' - \frac{0{,}11}{0{,}59 \cdot 0{,}49} \cdot (U_B - U_Y)'$$

$$= -0{,}58 \cdot (U_R - U_Y)' - 0{,}38 \cdot (U_B - U_Y)'.$$

Wir sehen also, daß die Farbdifferenzspannung $(U_G - U_Y)$ aus einem Anteil $(U_R - U_Y)'$ und einem Teil $(U_B - U_Y)'$ besteht.

In Abb. III. 2. 8. ist sowohl die Amplitude als auch die Phasenlage dieser Farbdifferenzspannung $(U_G - U_Y)$ eingetragen. Aus den beiden Anteilen $(U_R - U_Y)'$ und $(U_B - U_Y)'$ ergibt sich eine Vektorlänge von

$$\sqrt{(-0{,}38)^2 + (-0{,}58)^2} = 0{,}70.$$

Dies bedeutet, daß die Farbdifferenzspannung $(U_G - U_Y)'$ als reduzierte Amplitudengröße aus $(U_G - U_Y) \cdot 1{,}43$ besteht. $(U_G - U_Y)'$ besteht damit aus folgenden Primärfarbanteilen:

$$(U_G - U_Y)' = -0{,}43\ U_R + 0{,}59\ U_G - 0{,}16\ U_B.$$

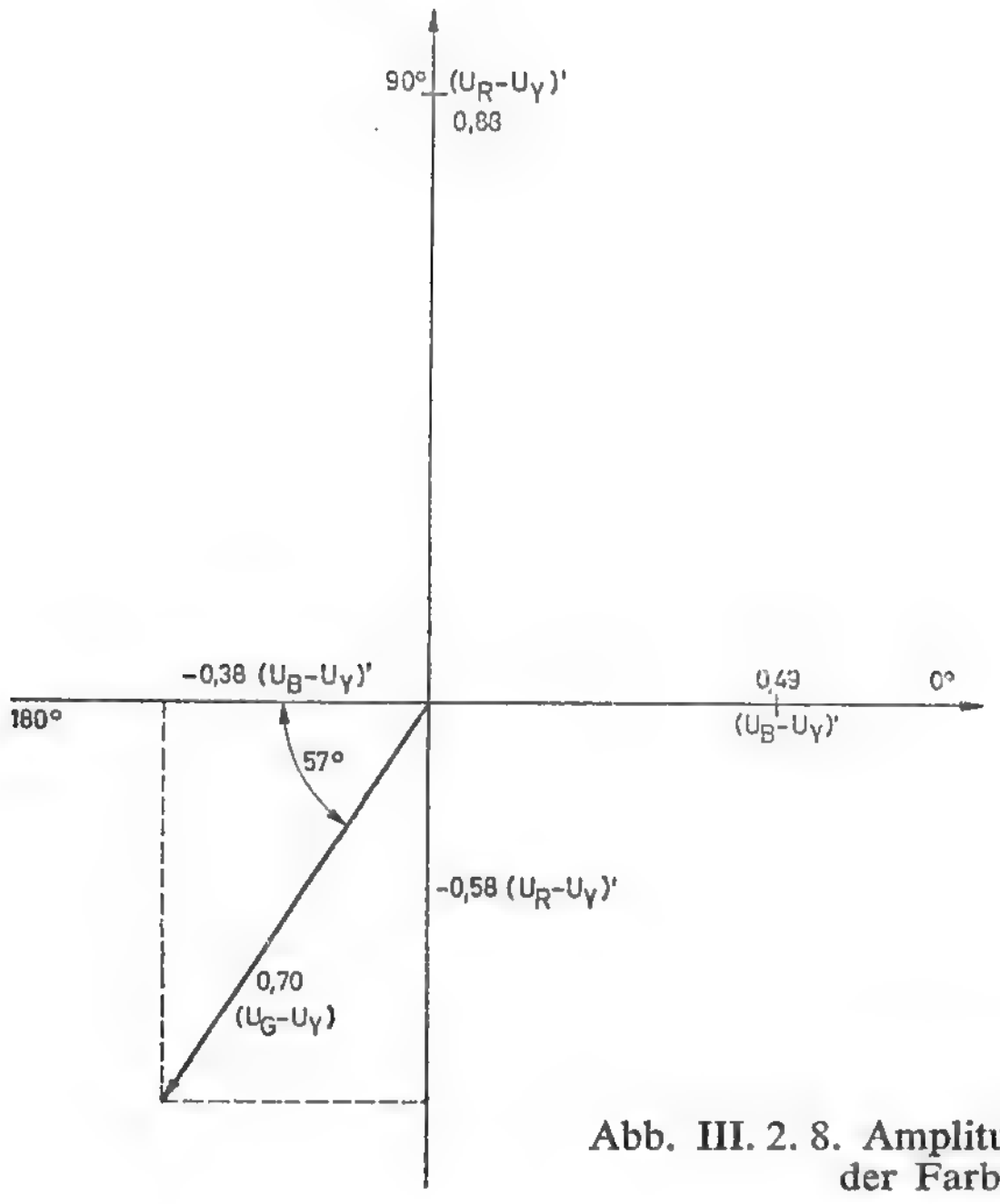


Abb. III. 2. 8. Amplituden und Phasenverhältnisse der Farbdifferenzsignale.

Diese Werte muß man auch erhalten, wenn man, wie es in Abb. III. 2. 9. gemacht wurde, die drei Primärfarben Rot, Grün und Blau rechtwinklig auf diese Achse der Farbdifferenzspannung $(U_G - U_Y)'$ projiziert. Wenn wir jetzt noch einmal zusammenfassen, so können wir die drei Farbdifferenzspannungen für die Kameraausgangssignale und ihre entsprechend reduzierten Amplitudenwerte für die Farbartmodulationsspannung folgendermaßen darstellen:

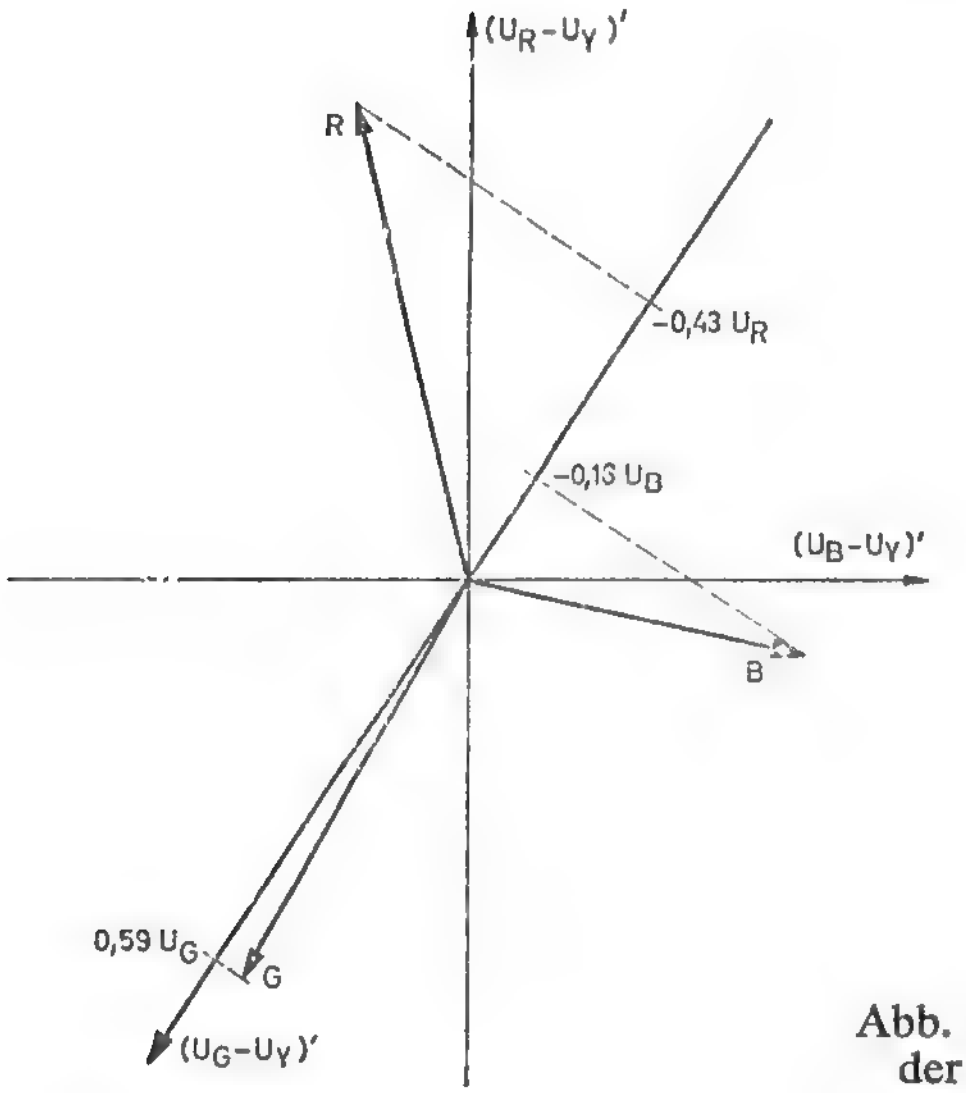


Abb. III. 2. 9. Primärfarbspannungen auf der $(U_G - U_Y)'$-Farbdifferenzachse.

Kamerasignale:

$$U_R - U_Y = +\ 0{,}70\ U_R - 0{,}59\ U_G - 0{,}11\ U_B$$
$$U_B - U_Y = -0{,}30\ U_R - 0{,}59\ U_G + 0{,}89\ U_B$$
$$U_G - U_Y = -0{,}30\ U_R + 0{,}41\ U_G - 0{,}11\ U_B$$

Reduzierte Modulationsamplituden:

$$(U_R - U_Y)' = +\ 0{,}62\ U_R - 0{,}52\ U_G - 0{,}10\ U_B$$
$$(U_B - U_Y)' = -0{,}15\ U_R - 0{,}29\ U_G + 0{,}44\ U_B$$
$$(U_G - U_Y)' = -0{,}43\ U_R + 0{,}59\ U_G - 0{,}16\ U_B$$

III. 3. I- und Q-Signale

Genaue und umfangreiche Untersuchungen haben gezeigt, daß das menschliche Auge für Farbunterschiede nicht nur wesentlich unempfindlicher ist als für reine Helligkeitsunterschiede, sondern daß auch für verschiedene Farbabstufungen größere Differenzen bestehen. Trägt man in einem Farbdreieck innerhalb des Spektralfarbenzuges Farbflächen ein, für die das Auge relativ gleiche Farbunterschiedsmerkmale wahrnehmen kann, so kommt man zu Farbflächen ellipsenförmiger Gestalt, die alle in einer bestimmten Richtung angeordnet sind.

Verhältnismäßig groß sind diese ellipsenförmigen Farbflächen im Gebiet der grünen Farbe, während sie bei der blauen Farbe am kleinsten werden. Unabhängig von der Größe dieser Farbflächen zeigen alle Ellipsen mit ihrer längeren Achse in die gleiche Richtung. Die Hauptrichtung

für die langen Ellipsenachsen verläuft dabei vom Gebiet der blauen Farbe in Richtung zum Gelb-Grün. Dies bedeutet offenbar, daß relative Farbunterschiede, die in dieser Richtung der längeren Ellipsenachse auftreten, nur verhältnismäßig großflächig vom menschlichen Auge wahrgenommen werden können. Diese relativ großflächige Unterscheidungsmöglichkeit für Farben bedeutet aber nichts anderes, als daß die Farbempfindlichkeit entsprechend gering ist und damit analog die elektrisch hierfür benötigte Bandbreite nur sehr klein zu sein braucht. Umgekehrt kann man jedoch in der Hauptrichtung der kurzen Ellipsenachsen eine wesentlich bessere Farbauflösung für das menschliche Auge finden. Ganz grob betrachtet, müßte sich die Farbempfindlichkeit in diesen beiden Hauptrichtungen entsprechend der Länge der beiden Ellipsenachsen verhalten. Dies ergibt ein Verhältnis von etwa 1 : 3. Wenn man für die maximale Leuchtdichte-Auflösung eine Bandbreite von 5 MHz wie beim Schwarz/Weiß-Fernsehen festlegt, so entsprechen die Farbempfindlichkeiten auf der Achse minimaler Augenempfindlichkeit einer Bandbreite von 600 kHz und auf der Achse maximaler Augenempfindlichkeit 1,8 MHz.

Trägt man, wie in Abb. III. 3. 1., die beiden Hauptachsen für die minimale bzw. maximale Augenempfindlichkeit im Spektralfarbenzug des Farbdreieckes so ein, daß sie durch den Weißpunkt laufen, so geht die eine Achse für die minimale Augenempfindlichkeit von der Farbe Blau-Purpur über Weiß zu einem Gelb-Grün und die andere Achse von Orange über

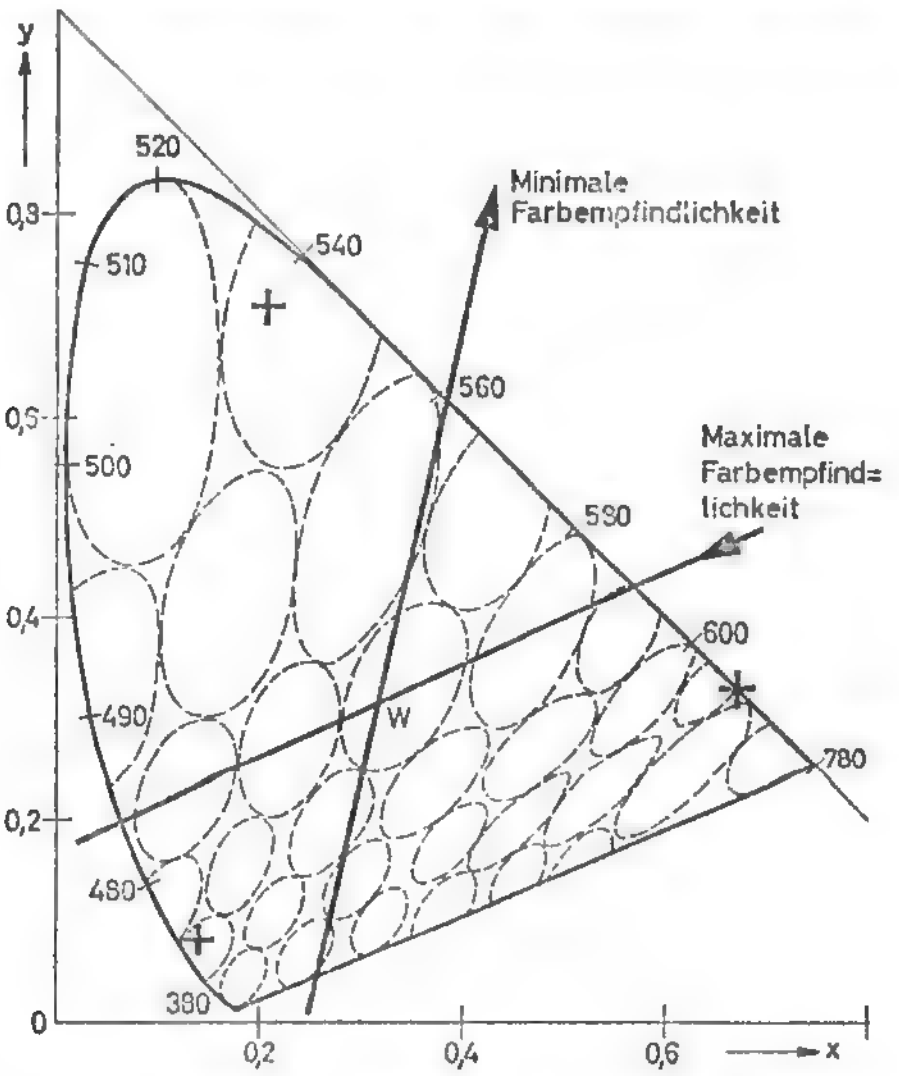


Abb. III. 3. 1. Farbflächen gleicher Unterschiedsmerkmale.

Weiß nach Cyan. Wichtig ist, bei der Definition der Farbbandbreiten zu erkennen, daß diese erforderlichen Bandbreiten durch unsere Augenempfindlichkeit festgelegt werden und nicht primär eine vorgenommene elektrische Beschneidung der Übertragungsfrequenzen für die Farbe darstellen, weil z.B. im Übertragungskanal kein größerer Frequenzumfang zur Verfügung stehen würde. Man darf auf keinen Fall davon ausgehen, daß Farbeindrücke, die z.B. nur mit einer Bandbreite von 600 kHz übertragen werden, so große Farbflächen im Empfänger erzeugen, daß darunter irgendwelche Auflösungen leiden. Es ist vielmehr so, daß da, wo unser Auge Schwarz/Weiß-Unterschiede bei der Grenzfrequenz von 5 MHz nicht mehr unterscheiden kann, auch die Farbunterschiede, die mit 600 kHz übertragen werden, nicht mehr wahrzunehmen sind, wenn die feineren Bildeinzelheiten in Schwarz/Weiß als Leuchtdichtemodulation bis 5 MHz übertragen werden. In Abb. III. 3. 2. sind die beiden Achsen der minimalen und maximalen Farbempfindlichkeit, die als *Q*- bzw. *I*-Achse bezeichnet werden, als elektrische Modulationsachsen vereinfacht im Farbdreieck eingetragen.

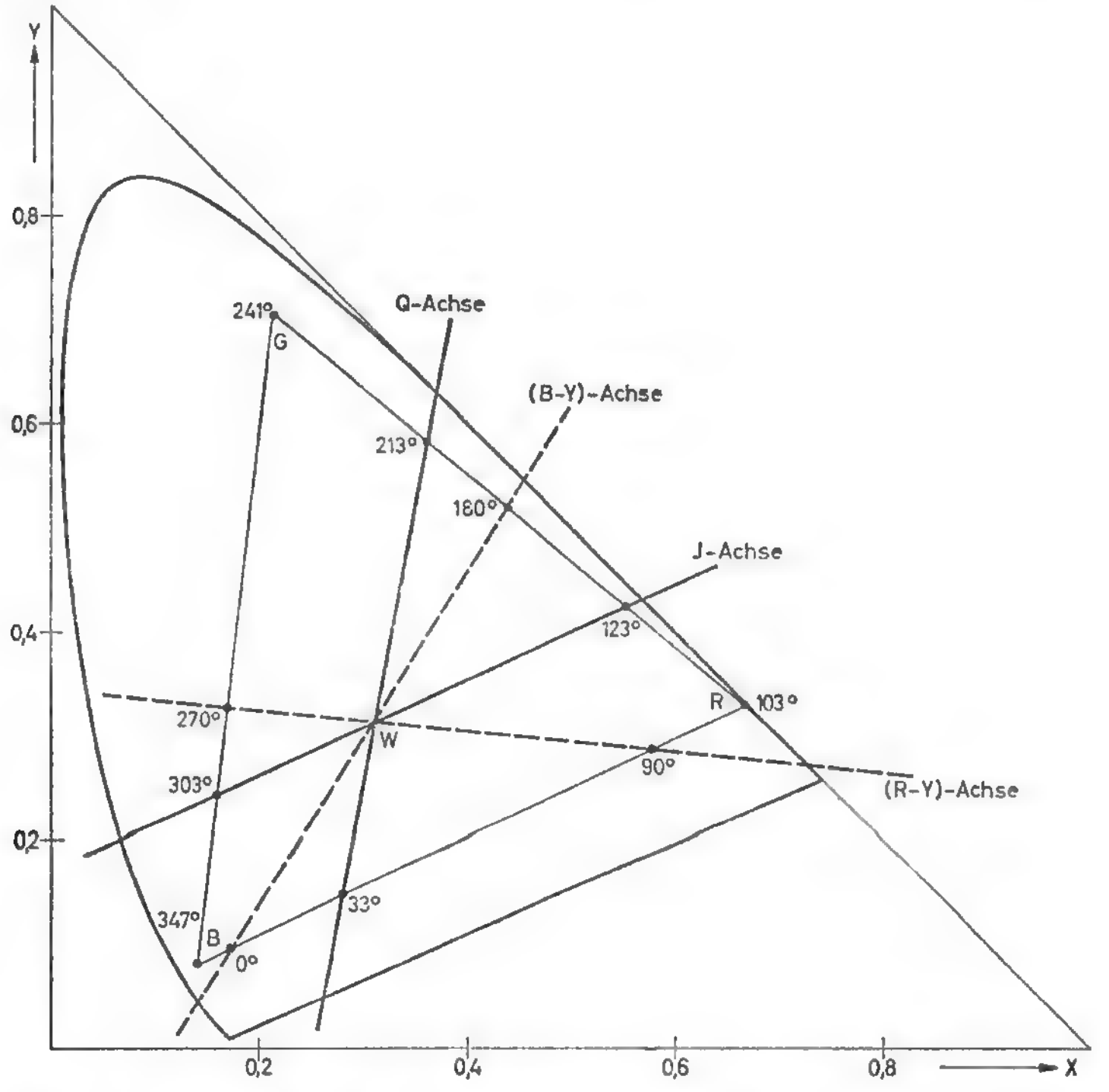


Abb. III. 3. 2. Lage der Modulationsachsen für die Farbdifferenzsignale.

Man kann nämlich für die verschiedenen Farbkomponenten, die auf die Modulationsachsen bezogenen elektrischen Phasenwinkel eintragen. Auf den Farbdreiecksseiten ergibt sich dann eine Phasenlage der Primärfarben, bezogen auf die $(U_B - U_Y)'$-Achse als Ausgangspunkt (0°), die für die blaue Farbe einen Wert von 347°, für Rot 103° und für Grün 241° hat, wie wir es im Achsenkreuz der Abb. III. 2. 7. bereits kennengelernt hatten. Die $(B - Y)'$ und $(R - Y)'$-Achsen laufen dabei durch den Weißpunkt von 0° bis 180° bzw. 90° bis 270°. Um 33° voreilend, liegen die beiden neuen Achsen, die wir als Q- und I-Achse bezeichnet haben. Die I-Achse entspricht dabei der maximalen und die Q-Achse der minimalen Farbempfindlichkeit. Damit läuft elektrisch die I-Achse von 123° über Weiß nach 303° und die Q-Achse von 33° über Weiß nach 213°.

Stellt man dies im rechtwinkligen Koordinatenkreuz, entsprechend der Abb. III. 3. 3. dar, so erkennt man, daß sich aus den ursprünglichen Modulationsachsen für die $(B - Y)'$- bzw. $(R - Y)'$-Werte durch einfache Koordinatentransformation die Amplituden für das I- bzw. Q-Signal bestimmen lassen. Man sieht z.B., daß das I-Signal sowohl aus einem Amplitudenteil des $(R - Y)'$- als auch des $(B - Y)'$-Signals besteht, wobei das $(R - Y)'$-Signal mit dem cos 33° und das $(B - Y)'$-Signal mit dem sin 33° multipliziert werden muß.

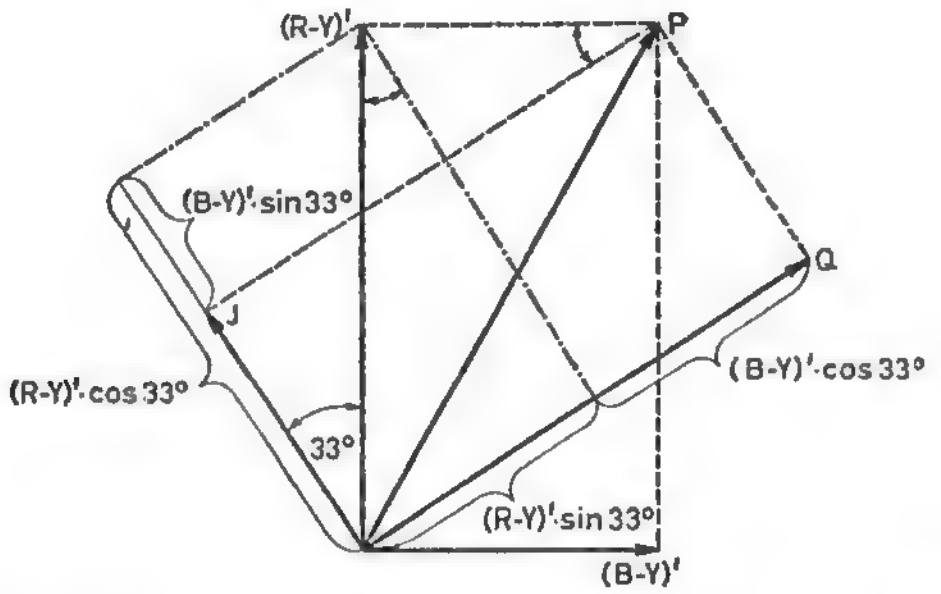


Abb. III. 3. 3. Zusammensetzung der I- und Q-Signale
$I = (R - Y)' \cdot \cos 33° - (B - Y)' \cdot \sin 33°$
$Q = (R - Y)' \cdot \sin 33° + (B - Y)' \cdot \cos 33°$

Für das Q-Signal ergibt sich analog das gleiche, nur daß hier das $(R - Y)'$-Signal mit dem sin 33° und das $(B - Y)'$-Signal mit dem cos 33° multipliziert wird. Setzt man die entsprechenden Werte der drei Primärfarben ein, so erhält man:

$$U_I = (U_R - U_Y)' \cdot \cos 33° - (U_B - U_Y)' \cdot \sin 33°$$
$$U_Q = (U_R - U_Y)' \cdot \sin 33° + (U_B - U_Y)' \cdot \cos 33°$$
$$U_I = (U_R - U_Y) \cdot 0{,}88 \cdot \cos 33° - (U_B - U_Y) \cdot 0{,}49 \cdot \sin 33°$$
$$U_Q = (U_R - U_Y) \cdot 0{,}88 \cdot \sin 33° + (U_B - U_Y) \cdot 0{,}49 \cdot \cos 33°$$
$$U_I = (U_R - U_Y) \cdot 0{,}74 - (U_B - U_Y) \cdot 0{,}27$$
$$U_Q = (U_R - U_Y) \cdot 0{,}48 + (U_B - U_Y) \cdot 0{,}41$$
$$U_I = 0{,}60\, U_R - 0{,}28\, U_G - 0{,}32\, U_B$$
$$U_Q = 0{,}21\, U_R - 0{,}52\, U_G + 0{,}31\, U_B$$

Für die senderseitige Übertragung der Modulationsspannungen U_I und U_Q muß also nach den drei Aufnahmekameras eine Matrix angeordnet werden, die aus den drei Primärspannungen U_R, U_G und U_B die dazugehörigen Amplitudenwerte zur Bildung der Farbartspannung liefert. Diese Werte für die drei Primärfarben Rot, Grün und Blau, bezogen auf die Modulationsachsen I und Q, sind in Abb. III. 3. 4. amplituden- und phasenmäßig eingetragen.

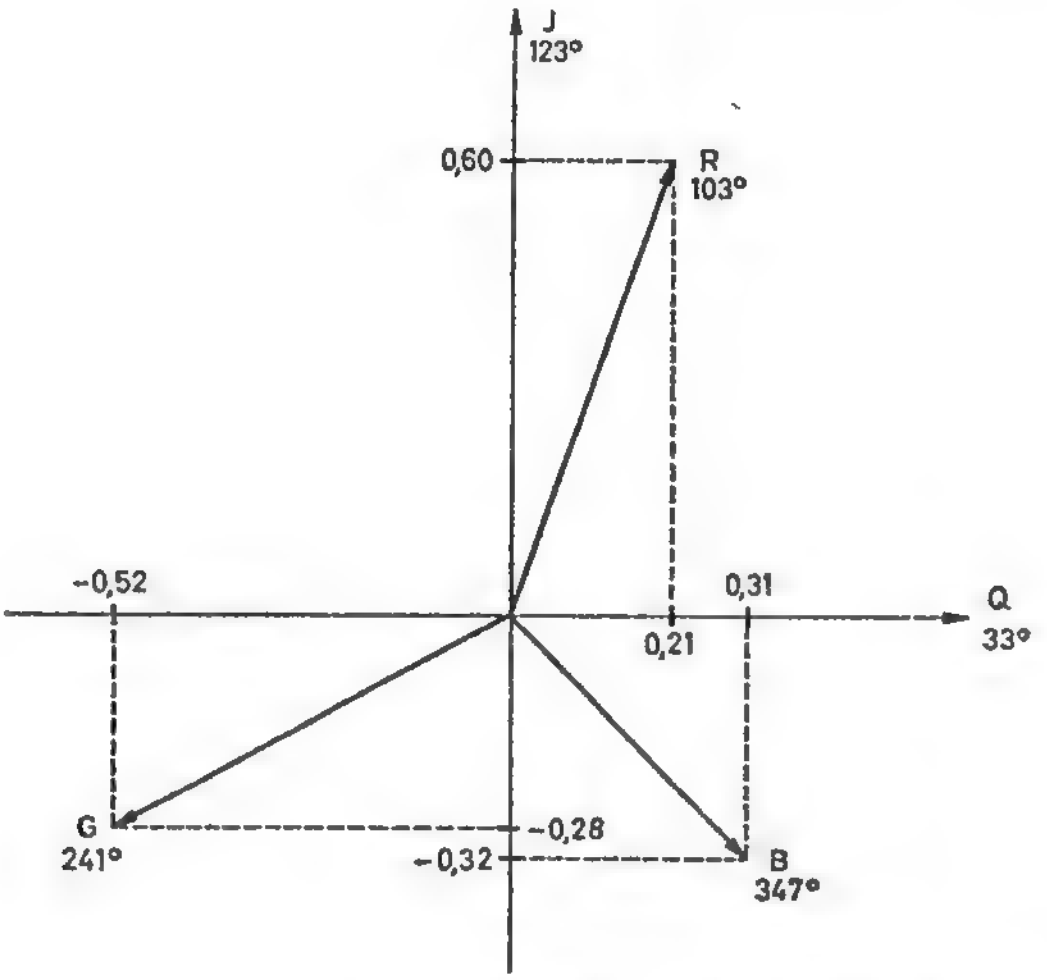


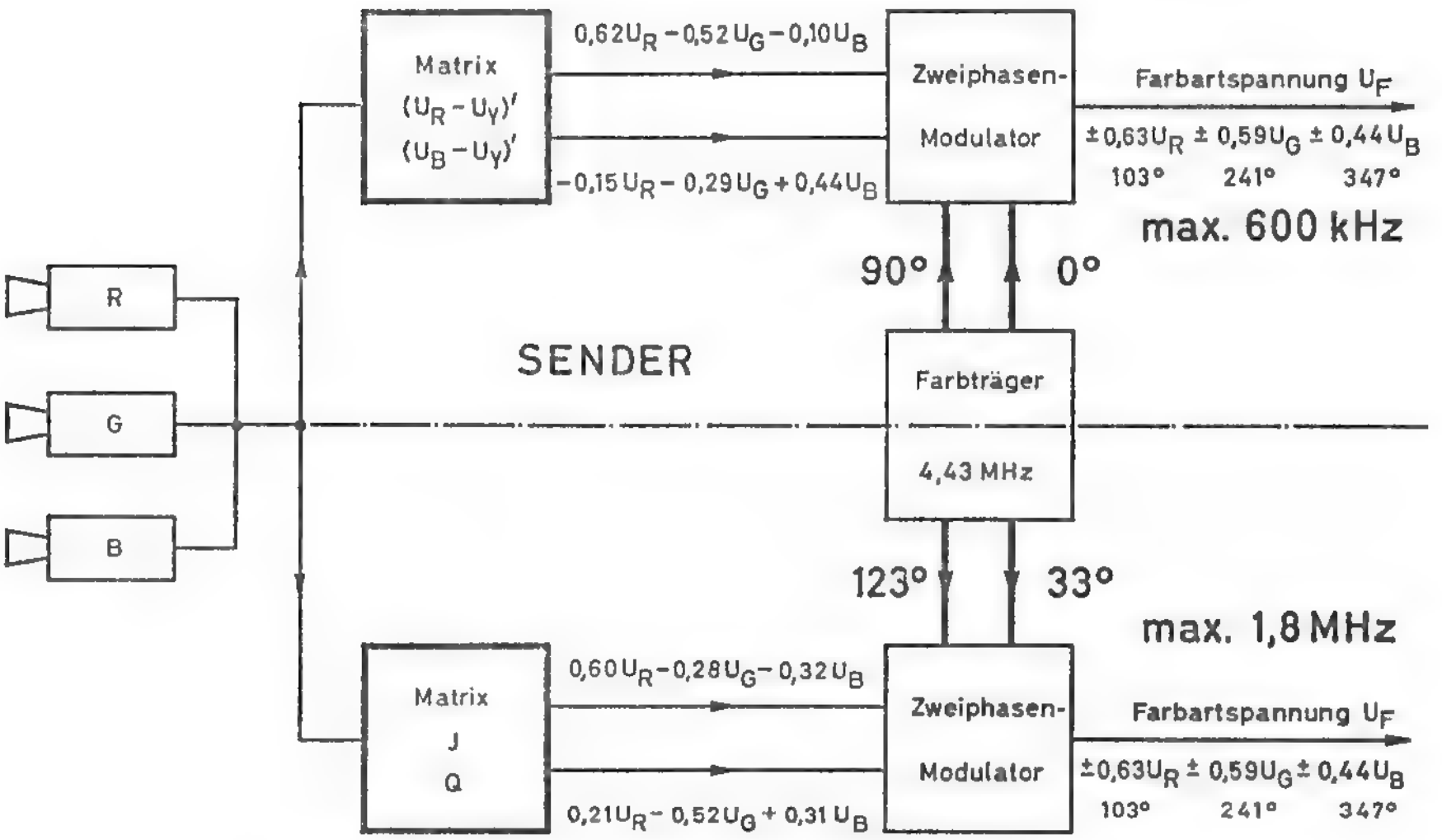
Abb. III. 3. 4. Amplituden der Primärfarben auf den I- und Q-Modulationsachsen.

Da zwischen den beiden Modulationsachsen für die Farbartspannung U_I und U_Q und den beiden Farbdifferenzspannungen $(U_R - U_Y)'$ und $(U_B - U_Y)'$ lediglich eine Drehung des Achsenkreuzes um 33° vorliegt, soll nachfolgend die Behandlung aller weiteren Probleme mit den Farbdifferenzspannungen $(U_R - U_Y)'$ und $(U_B - U_Y)'$ geschehen. Dies ist umso einfacher, als auch später im Empfänger in jedem Fall für die Ansteuerung der Bildröhre die Farbdifferenzspannungen $(U_R - U_Y)$,

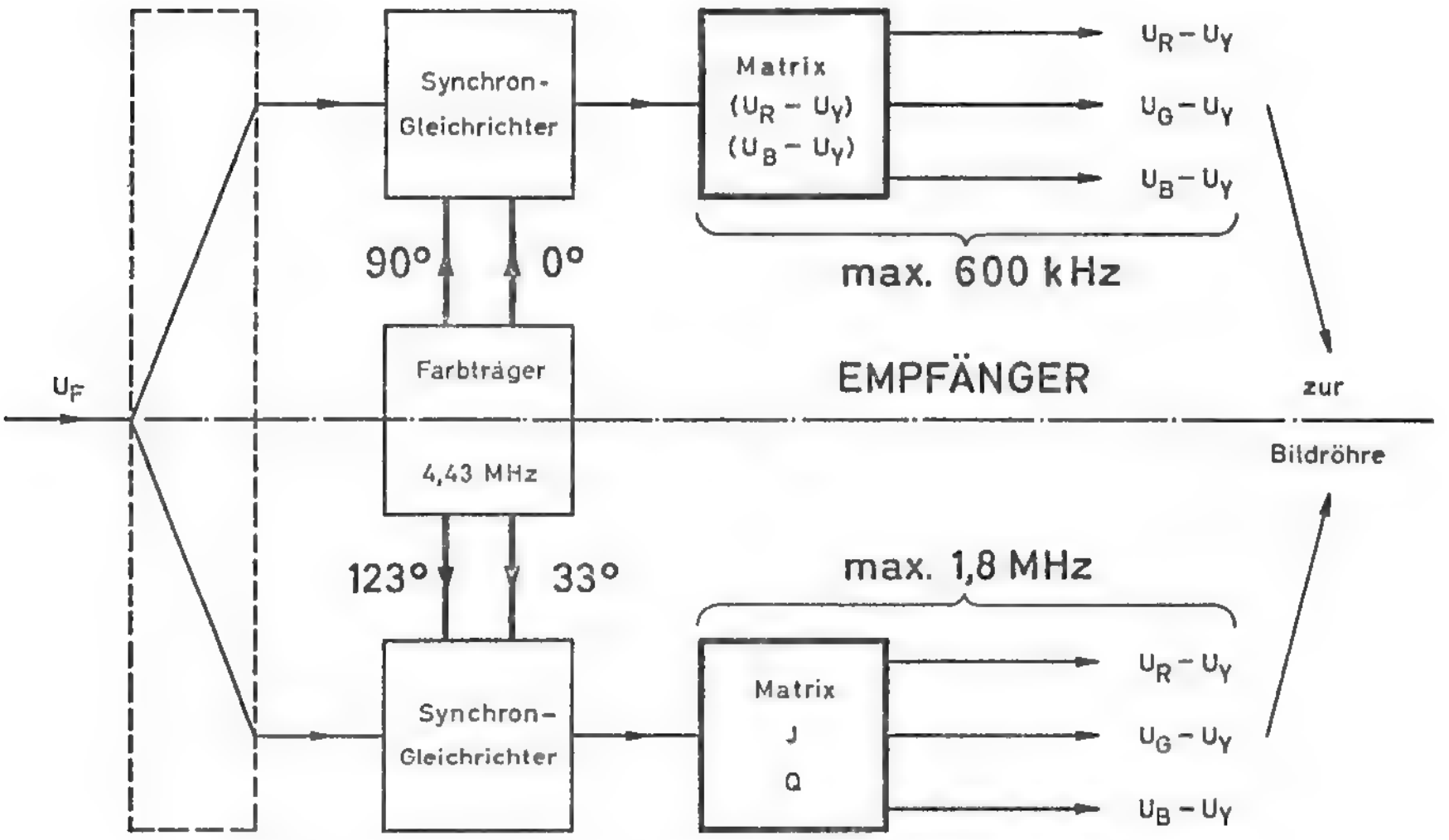
(U_B — U_Y) bzw. (U_G — U_Y) wiedergewonnen werden müssen und die Umformung der Kamerasignale in die *I*- und *Q*-Amplituden nur eine zusätzliche Unübersichtlichkeit hineinbringt, zumal sich der einzige Unterschied nur in der abweichenden Bandbreite für die Farbinformation der *I*-Achse bemerkbar macht.

Man kann alle Probleme der gesamten Farbfernsehtechnik verstehen, auch wenn man keinerlei Kenntnis der *I*- und *Q*-Signale besitzt, unter der einschränkenden Bedingung, daß die Farbinformation einheitlich mit ± 600 kHz übertragen und wiedergegeben wird. Die Festlegung von zwei Achsen unterschiedlicher Farbempfindlichkeit ist für die Farbfernsehnorm deshalb gewählt worden, damit auch für sehr hochwertige Empfänger eine optimal mögliche Übertragungsgüte erzielt werden kann. Die bisherige Schaltungstechnik der üblichen Heimempfänger zeigt jedoch, daß fast ausschließlich Schaltungsanordnungen zur Rückgewinnung der Farbinformation benutzt werden, die nur die beiden Farbdifferenzspannungen (U_R — U_Y)′ und (U_B — U_Y)′ mit ihrer einheitlichen Bandbreite von ± 600 kHz berücksichtigen. Dies liegt darin begründet, daß einmal die effektive Steigerung der Farbauflösung in normalen Heimempfängern nicht so stark ins Gewicht fällt und zum anderen ein spürbarer zusätzlicher Schaltungsaufwand für die Rückgewinnung der Farbinformation aus den I- und Q-Signalen erforderlich wird. Bei der späteren Behandlung der Synchron-Gleichrichter wird man erkennen, daß ein Sendersignal mit den Informationsspannungen der *I*- und *Q*-Achsen als (*R* — *Y*)′- und (*B* — *Y*)′-Signal gleichgerichtet werden kann, wobei nur die Phasenlage der Synchron-Gleichrichterschaltung die Drehung des Achsenkreuzes um 33° berücksichtigen muß. Um die Unterschiede zwischen den Farbdifferenzspannungen (U_R — U_Y)′ und (U_B — U_Y)′ bzw. den *I*- und *Q*-Signalen zu zeigen, ist in Abb. III. 3. 5. schematisch der Aufbau der Matrix und der Modulation bzw. Demodulation im Sender und Empfänger angegeben.

Läßt man die unterschiedlichen Bandbreiten außer Betracht, so ergibt sich nur eine Abweichung bei der Festlegung der Spannungsteiler in der Matrix und der Phasenlage der Trägerschwingung im Modulator bzw. Demodulator. Beide Farbartspannungen lassen sich also durch eine einfache lineare Transformation ineinander umformen und verhalten sich völlig gleichwertig, mit Ausnahme der Bandbreite des I-Signals. Dies geht deutlich aus Abb. III. 3. 5a für die Senderstufen hervor. Im Falle der Modulation mit den Farbdifferenzspannungen (U_R — U_Y)′ bzw. (U_B — U_Y)′ muß die Matrix nach den Aufnahmekameras Spannungsteiler enthalten, die 0,62 U_R — 0,52 U_G — 0,10 U_B bzw. — 0,15 U_R — 0,29 U_G + 0,44 U_B



a) Matrix und Modulationsschema für $(R-Y)'$- und $(B-Y)'$- bzw. J- und Q-Signale



b) Demodulationsschema für $(R-Y)'$- und $(B-Y)'$- bzw. J- und Q-Signale

Abb. III. 3. 5. Unterschiede der Matrix und Phasenlage des Farbträgers bei den $(R - Y)'$- und $(B - Y)'$- bzw. I- und Q-Signalen.

liefern. Die Phasenlage der Farbträgerschwingung für den Zweiphasenmodulator beträgt hierbei 0° bzw. 90°. Werden dagegen die *I*- und *Q*-Signale zur Modulation herangezogen, so müssen die Spannungsteiler der Matrix so geändert werden, daß die Spannungen 0,60 U_R — 0,28 U_G — 0,32 U_B bzw. 0,21 U_R — 0,52 U_G + 0,31 U_B zur Verfügung stehen. Die Zuführung des Farbträgers zum Zweiphasenmodulator geschieht dann in den Phasenlagen 33° bzw. 123°. In beiden Fällen ist die vom Zweiphasenmodulator gelieferte Farbartspannung

$$U_F \quad \underset{103°}{\pm 0{,}63\ U_R} \quad \underset{241°}{\pm 0{,}59\ U_G} \quad \underset{347°}{\pm 0{,}44\ U_B}$$

Lediglich die Farbabstufungen zwischen den Farbtönen Orange und Cyan reichen im Falle der Modulation mit den *I*- und *Q*-Signalen bandbreitenmäßig statt bis 600 kHz jetzt bis 1,8 MHz. Die gleichen charakteristischen Unterschiede wie beim Sender finden wir auch im Empfänger wieder. In Abb. III. 3. 5b ist dies angedeutet. Hierbei ist jedoch zu beachten, daß, wie wir später sehen werden, der Schaltungsaufwand für die *I*- und *Q*-Matrix merklich größer wird als für die (*R* — *Y*)- und (*B* — *Y*)-Matrix.

Zusammenfassung

Durch die Kompatibilitätsforderung, den Bildträger bei Farbfernsehsendungen mit einem Leuchtdichtesignal zu modulieren, das den Helligkeitswerten entspricht, die eine Schwarz/Weiß-Kamera für das gleiche Bild liefern würde, kommt man für die drei Primärfarben zu der Leuchtdichte-Zusammensetzung $U_Y = 0{,}30\ U_R + 0{,}59\ U_G + 0{,}11\ U_B$. Die Amplituden dieser Leuchtdichtespannung stellen die Modulationsspannung des Bildträgers dar, die im Bereich zwischen dem Schwarz- und Weißpegel mit jeweils 70% bzw. 10% der maximalen Senderamplitude liegt. Neben diesem Leuchtdichtesignal muß weiterhin der Farbton und die Sättigung zusätzlich übertragen werden. Man wählt hierfür zwei Farbdifferenzspannungen, die sich so zusammensetzen, daß man von der roten bzw. blauen Primärfarbe das Leuchtdichtesignal abzieht. Hieraus erhält man die beiden Farbdifferenzspannungen:

$$U_R - U_Y = +\ 0{,}70\ U_R - 0{,}59\ U_G - 0{,}11\ U_B$$
$$U_B - U_Y = -\ 0{,}30\ U_R - 0{,}59\ U_G + 0{,}89\ U_B.$$

Aus beiden Farbdifferenzspannungen wird das Farbartsignal gewonnen, welches sich aus der rechtwinkligen Addition dieser beiden Teilkomponenten zusammensetzt. Die hieraus resultierenden Amplituden der Farbartspannungen für die drei Primärfarben ergeben, zum Leuchtdichtesignal des

Bildträgers addiert, eine zum Teil erhebliche Übermodulation. Begrenzt man diese Übermodulation auf den für die Praxis zulässigen Wert von 33%, so kann man hieraus die reduzierten Farbdifferenzspannungen bestimmen und für die drei Primärfarben die sich ergebenden Amplituden und Phasenlagen in einem Achsenkreuz eintragen. Aus den beiden Farbdifferenzspannungen $(U_R - U_Y)'$ und $(U_B - U_Y)'$, die beim Sender für die Modulation des Farbträgers herangezogen werden, kann man auch die dritte Farbdifferenzspannung $U_G - U_Y$ bestimmen, welche später im Empfänger benötigt wird, damit die Wiedergabe aller drei Primärfarben vorgenommen werden kann. Da unser Auge für verschiedene Farbzusammensetzungen eine unterschiedliche Empfindlichkeit zeigt, kann man abweichend von den beiden Achsen der Farbdifferenzspannungen $(U_R - U_Y)'$ und $(U_B - U_Y)'$ Modulationsachsen festlegen, die eine optimalere Ausnutzung der Farbfernsehübertragung gestatten. Legt man eine Modulationsachse im Farbdreieck für die maximale Augenempfindlichkeit der Farben fest, so läuft diese Achse von Orange über Weiß nach Cyan, während die dann wiederum elektrisch um 90° versetzte zweite Modulationsachse den Farbbereich von einem Blau-Purpur über Weiß zum Gelb-Grün umfaßt. Der relative Unterschied der Augenempfindlichkeit zwischen diesen beiden Achsen beträgt etwa 1 : 3 so daß man für die Achse minimaler Augenempfindlichkeit, genauso wie bei den Farbdifferenzsignalen, eine Bandbreite von 600 kHz wählt, während die Achse maximaler Augenempfindlichkeit für eine Bandbreite von 1,8 MHz ausgelegt ist. Die beiden neuen Modulationsachsen werden in Anlehnung an die Zweiphasenmodulation als *I*-Achse (Inphase) und als *Q*-Achse (Quadraturphase) bezeichnet. Diese *I*- und *Q*-Achsen liegen, bezogen auf die beiden Farbdifferenzspannungen $(U_R - U_Y)'$ und $(U_B - U_Y)'$, im Achsenkreuz elektrisch um 33° voreilend.

KAPITEL IV

FARBTRÄGER

Übersicht

Der zusätzliche Farbträger im Übertragungskanal zwischen Bild- und Tonträger muß so angeordnet werden, daß eine minimale Rasterstörung sowohl im Schwarz/Weiß- als auch im Farbempfänger auftritt. Da es, unabhängig von der gewählten Frequenz des Farbträgers, elektrisch immer zu Interferenzstörungen kommt, muß man diese so wählen, daß für das Auge auf dem Bildschirm eine zeitliche und räumliche Integrationswirkung erzielt wird, die zur Auslöschung der Interferenzstörung führen kann. Der einfachste Fall der Auslöschung der Helligkeitseindrücke durch die Integrationswirkung des Auges ist beim Halbzeilen-Offset gegeben. Dieser Halbzeilen-Offset nutzt die Tatsache aus, daß die Bildinformation als Modulation des Bildträgers sich als statistische Häufung in Frequenzgruppen als Oberwellen zum Bildträger mit Abstand der Horizontalfrequenz ausbildet. Zwischen diesen Frequenzgruppen ist elektrisch praktisch keine Informationsspannung vorhanden. Besteht die Farbträgerfrequenz aus einem ungradzahligen Vielfachen der halben Horizontalfrequenz, so liegen die Informationsspannungen dieses Farbträgers genau in den Lücken zwischen den Informationsspannungen des Bildträgers.

Man erhält hierdurch eine Frequenzverkämmung beider Informationsspannungen. Voraussetzung hierfür ist jedoch eine starre Verkopplung zwischen Bild- und Farbträger. Diese starre Verkopplung kann, genau wie beim Taktgeber der Schwarz/Weiß-Fernsehsender, durch Teiler- und Vervielfacherstufen erreicht werden. Von einem Muttergenerator abgeleitet, wird sowohl die Vertikal- als auch Horizontalfrequenz und der Frequenzabstand von Bild-, Farb- und Tonträger festgelegt. Neuere Untersuchungen haben gezeigt, daß durch ein sogenanntes Präzisions-Offsetverfahren die Unterdrückung der Interferenzstörungen gegenüber dem Halbzeilen-Offset noch weiter gesteigert werden kann. Bei diesem Präzisions-Offset geht man davon aus, daß eine Interferenzstörung dann am geringsten ist, wenn das Störmuster auf dem Bildschirm sich nicht bewegt. Dies ist dann der Fall, wenn der Farbträger ein ganzzahliges Vielfaches der Bildfrequenz ist, wobei ganzzahlige Vielfache der Horizontalfrequenz nicht vorkommen dürfen.

Dieser Präzisions-Offset läßt sich mit einem Drittel oder einem Fünftel der Horizontalfrequenz durchführen.

IV. 1. Frequenzwahl des Farbträgers

Aus der Tatsache, daß Interferenzstörungen dann am geringsten sind, wenn die Interferenzfrequenz möglichst hoch ist, und aus der unteren Bandbreite für die Farbübertragung von 600 kHz ergibt sich eine Frequenz des Farbträgers, die bei ca. 4,4 MHz liegen kann. Dieser Farbträger bei 4,4 MHz erzeugt sowohl mit dem Bild- als auch mit dem Tonträger durch Differenzfrequenzbildung an der Gleichrichterdiode im Empfänger eine Interferenzstörung. Es wird sich mit dem Bildträger 4,4 MHz und mit dem Tonträger 1,1 MHz bilden. Zur Reduzierung dieser Interferenzstörung wird senderseitig der Farbträger im Modulator unterdrückt und nur die Seitenbänder als Modulationsprodukt des Farbträgers ausgestrahlt. Um die verbleibende Reststörung, die sich noch aus diesem Modulationsprodukt mit dem Bild- und Tonträger bilden kann, weiter zu reduzieren, muß das Störmuster derart sein, daß für unser Auge eine Auslöschung der Helligkeits-

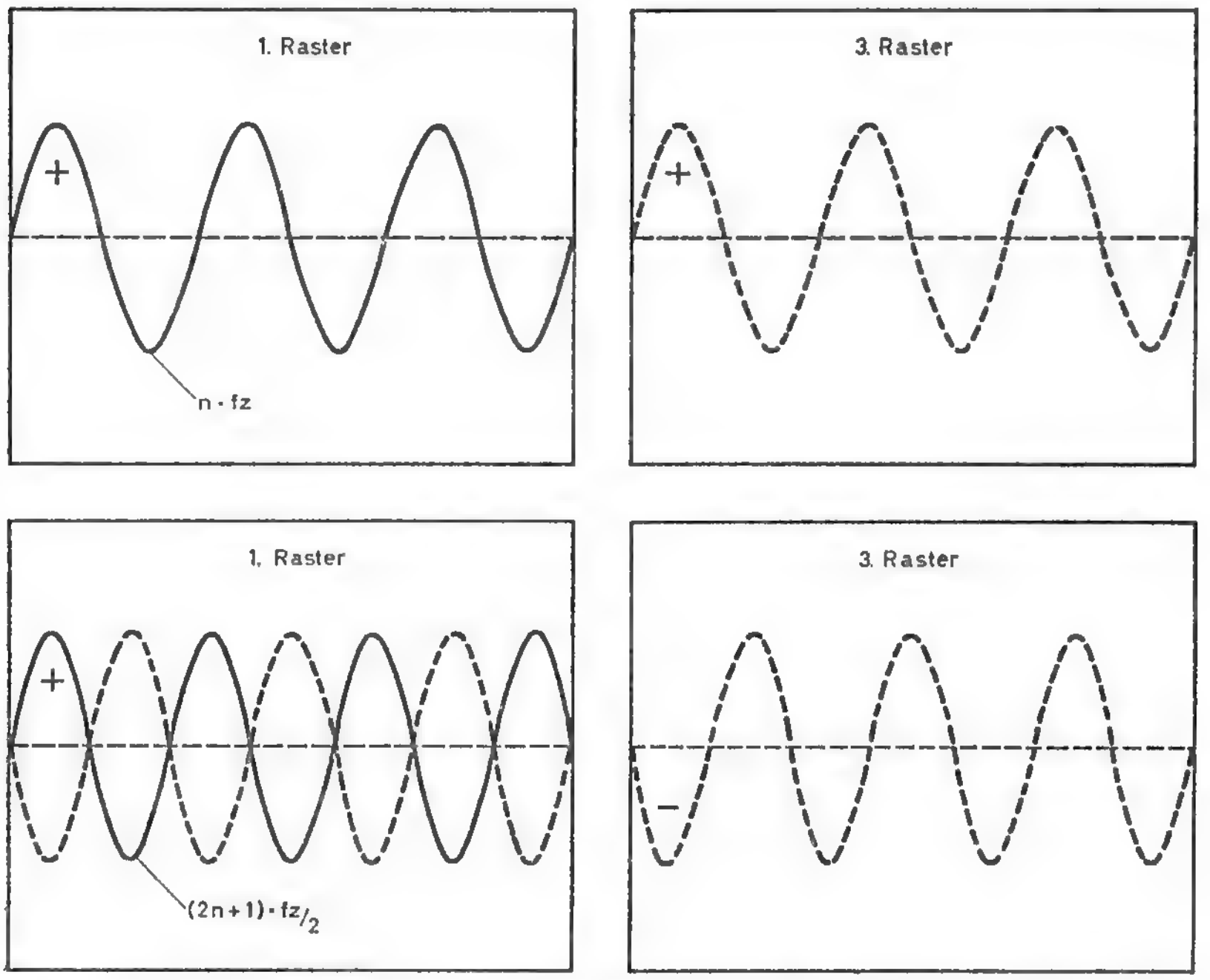


Abb. IV. 1. 1. Aufhebung der Rasterstörung beim Halbzeilen-Offset.

eindrücke auf dem Bildschirm erfolgt, da es keine Möglichkeit gibt, die Interferenzstörung elektrisch vollständig zu unterbinden.

Eine Auslöschung bestimmter Helligkeitseindrücke durch die Integrationswirkung unseres Auges kann dann erfolgen, wenn im bestimmten Rhythmus an der gleichen Bildschirmstelle helle und dunkle Bildpunkte aufeinander fallen. Dies kann z.B. im Rhythmus mit der halben Bildfrequenz von 12,5 Hz erfolgen.

In Abb. IV. 1. 1. ist eine Helligkeitsinformation in Form einer Sinus-Welle für zwei aufeinander folgende Bildraster eingetragen. Im ersten Fall besteht diese Helligkeitsinformation aus einem ganzzahligen Vielfachen der Horizontalfrequenz ($n \cdot f_Z$). Die Phasenlage der Helligkeitsinformation ist also nach jedem kompletten Bild die gleiche. Es werden also auf dem Bildschirm an den gleichen Stellen im Rhythmus der Bildfrequenz jeweils helle bzw. dunkle Bildpunkte aufeinander fallen. Damit wird, wenn die Helligkeitsinformation die Farbträgerfrequenz ist, diese als Interferenzstörung voll sichtbar. Besteht jedoch die Helligkeitsinformation aus einer Frequenz, die ein ungradzahliges Vielfaches der halben Horizontalfrequenz ist $(2\,n + 1) \cdot 1/2\, f_Z$, so ist zwischen zwei kompletten Bildern eine gegenphasige Helligkeitsinformation vorhanden. Es wird jetzt auf dem Bildschirm an gleichen Stellen einem hellen Bildeindruck ein dunkler folgen und durch die Integrationswirkung unseres Auges eine Auslöschung vorgenommen. Diese gegenseitige Auslöschung der Helligkeitseindrücke im Rhythmus der halben Bildfrequenz von 12,5 Hz erfolgt immer dann, wenn die zugrunde liegende Frequenz der Helligkeitsübertragung ein ungradzahliges Vielfaches der halben Horizontalfrequenz ist.

Da für die Auslöschung der Helligkeitseindrücke nur die Grundbedingung erfüllt werden muß, daß bei jedem Bildwechsel die Farbträgerstörung in Gegenphase auftritt, könnte im Prinzip jede beliebige Farbträgerfrequenz benutzt werden, wenn für die gegenseitige Auslöschung der Helligkeitseindrücke auf dem Bildschirm vor jedem Bildwechsel die Phase der Bildträgerspannung um 180° umgeschaltet wird. Der einfachste Fall, minimale Rasterstörung durch den Farbträger zu erzielen, ist beim sogenannten Halbzeilen-Offset gegeben. Für dieses Halbzeilen-Offset-Verfahren müssen wir eine Farbträgerfrequenz wählen, die aus einem ungradzahligen Vielfachen der halben Horizontalfrequenz besteht. Damit diese Bedingung immer erfüllt ist, muß der Farbträger mit dem Bildträger verkoppelt werden. Diese Verkopplung muß in jedem Fall über starre Frequenzteiler bzw. Vervielfacher erfolgen, da freilaufende Generatoren, auch wenn es sich um Quarzoszillatoren handelt, keine phasenstarre Verkopplung garantieren. Da Frequenzteiler dann am betriebssichersten arbei-

ten, wenn ihr Teilungsverhältnis nicht zu groß ist, muß man versuchen, eine Farbträgerfrequenz zu finden, die sich durch möglichst kleine Teiler auf die halbe Horizontalfrequenz herunterteilen läßt. Weil der Teilungsfaktor ein ungradzahliges Vielfaches der halben Horizontalfrequenz sein muß, werden die einzelnen Teiler aus Primzahlen bestehen. Untersucht man daraufhin die Frequenzen in der Nähe von 4,4 MHz, so findet man die nächstgünstige Frequenz bei 4,4296875 MHz. Diese Frequenz ist das 567-fache der halben Horizontalfrequenz und besteht aus den Teilungsfaktoren 3 : 3 : 3 : 3 : 7. Da der 5,5 MHz-Abstand zwischen Bild/Tonträger aus dem 704-fachen der halben Horizontalfrequenz besteht, ist auch automatisch der Farb-/Tonträgerabstand ein ungradzahliges Vielfaches der halben Horizontalfrequenz und damit eine Verkopplung sichergestellt ($137 \cdot 1/2\, f_Z$).

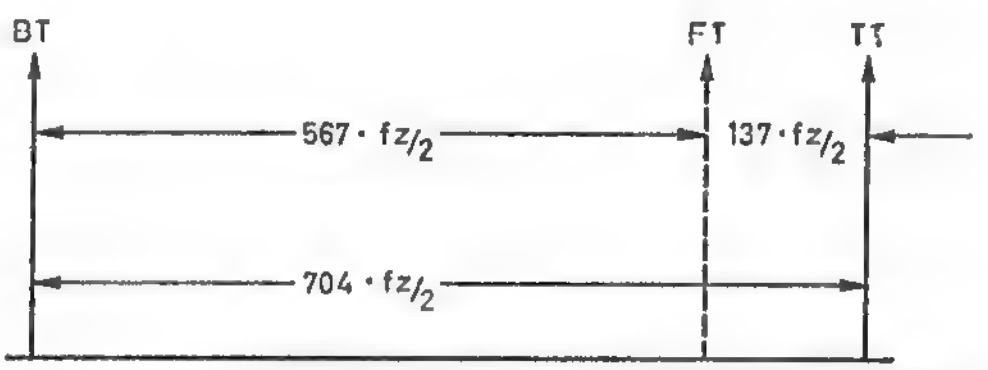


Abb. IV. 1. 2. Verkopplung des Farb- mit dem Bildträger beim Halbzeilen-Offset.

Die Lage des Farbträgers zum Bild- bzw. Tonträger aufgrund des gefundenen Wertes von 4,4296875 MHz gibt Abb. IV. 1. 2. wieder.

Man sieht wie der Farbträger sowohl mit dem Bild- als auch mit dem Tonträger über ein ungradzahliges Vielfaches der halben Horizontalfrequenz verkoppelt ist. Die Interferenzstörungen mit dem Bild- bzw. Tonträger werden sich also in ihren Helligkeitswerten auf dem Bildschirm nach jedem Bildwechsel durch die Integrationswirkung unseres Auges aufheben.

Das Halbzeilen-Offsetverfahren für den Farbträger hat seinen Ursprung darin, daß die Helligkeitsinformation des Bildträgers als statistische Häufung in Abständen mit Horizontalfrequenz vom Bildträger auftritt. Grundsätzlich baut sich nämlich das Modulationssignal des Bildträgers so auf, daß es aus Oberwellen der Bildfrequenz von 25 Hz besteht. Da die Bildfrequenz über den Taktgeber starr mit der Horizontalfrequenz von 15 625 Hz verkoppelt ist, erfolgt jeweils in Abständen mit der Horizontalfrequenz eine besonders starke Häufung der Modulationsspannung des Bildträgers. Sieht man sich daraufhin die Modulationsspannung als Seiten-

bandfrequenzen des Bildträgers an, so werden vom Bildträger bis zur Modulationsgrenze von 5 MHz, jeweils in Abständen mit Horizontalfrequenz, Frequenzgruppen mit einem Häufigkeitsmaximum vorhanden sein. In Abb. IV. 1. 3. ist dies vereinfacht dargestellt. Für ein ruhendes Bild besteht also die Modulationsspannung aus Oberwellen der Bildfrequenz 1/2 f_B und der Horizontalfrequenz f_Z. Eine eindeutige Häufung entsteht amplitudenmäßig jeweils im Abstand der Horizontalfrequenz f_Z.

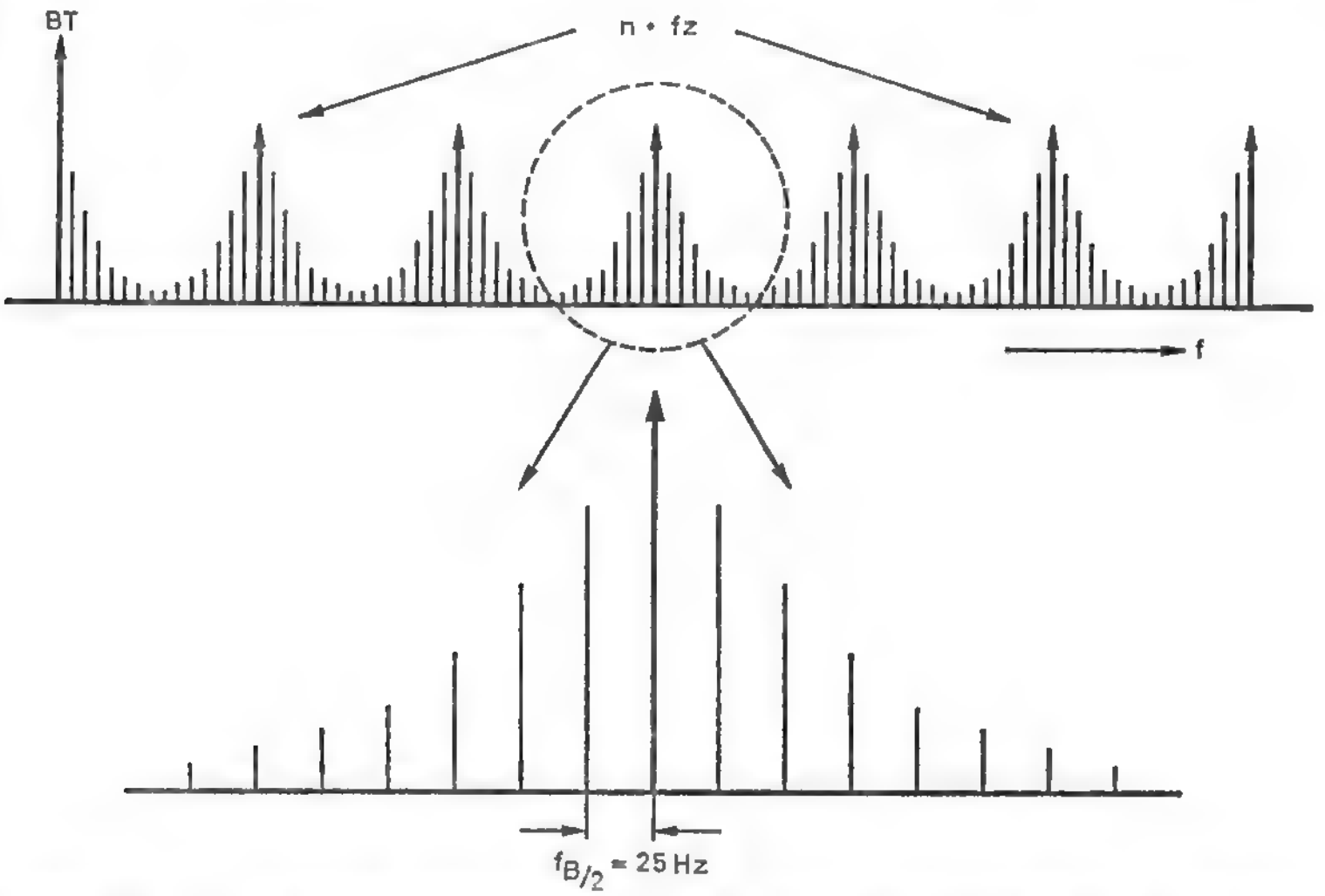


Abb. IV. 1. 3. Aufbau der Bildinformation aus Oberwellen von $f_{B/2}$ und f_z

Es gibt also im Übertragungsbereich zwischen diesen Häufungsstellen Frequenzgebiete mit relativ geringen Seitenbandamplituden, bzw. sogar Stellen, wo keine Informationsspannung vorhanden ist. Diese Stellen geringer Informationsspannung können als Platz für die zusätzliche Übertragung der Farbinformation gewählt werden. Damit die Informationsspannung des Farbträgers in die Lücken der Information des Bildträgers fällt, muß der Farbträger ein ungradzahliges Vielfaches der halben Horizontalfrequenz sein.

Diese Technik, als Frequenzverkämmung bezeichnet, gibt Abb. IV. 1. 4. wieder. Man sieht, daß die Bild- und Farbträgerinformationen jeweils genau auf Lücke stehen, bedingt durch das Verhältnis $n \cdot f_Z$ für die Bildträgerinformation und $(2\,n + 1) \cdot 1/2\, f_Z$ für die Farbträgerinformation. Theoretisch ist es möglich, bei dieser Frequenzverkämmung durch ein kammartiges Filter im Empfänger beide Informationsspannungen voneinander zu trennen, so daß keinerlei gegenseitige Beeinflussung stattfindet. Jedoch

läßt sich bisher mit vernünftigem wirtschaftlichen Aufwand kein derartiges Filter herstellen, so daß die Aufhebung der Interferenzstörung auf dem Bildschirm nur durch die zeitliche und räumliche Integrationswirkung unseres Auges erzielt wird.

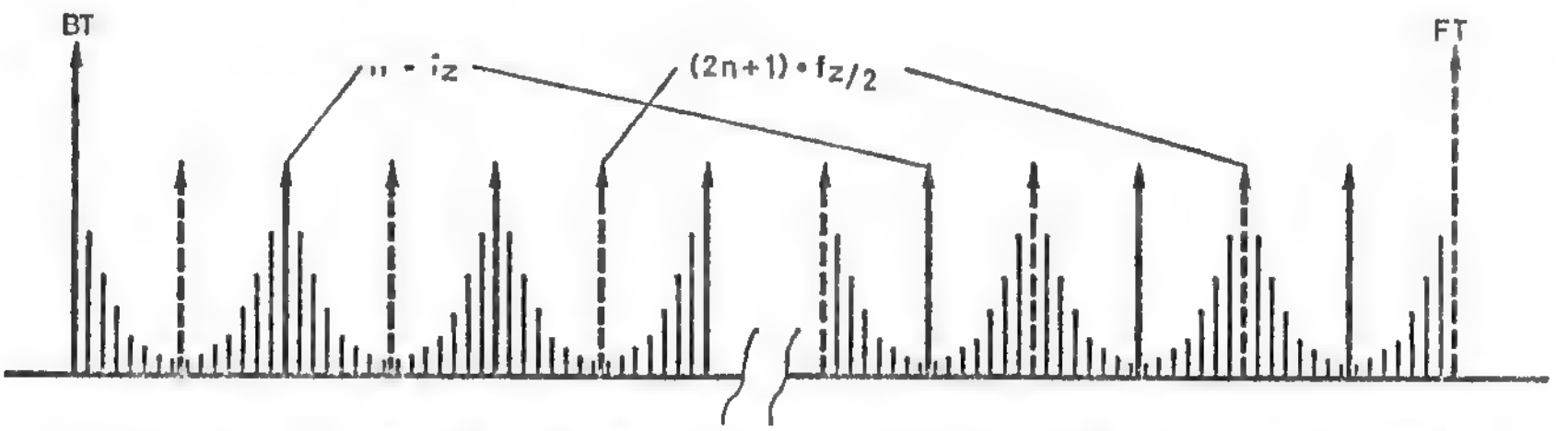


Abb. IV. 1. 4. Prinzip der Frequenzverkämmung beim Halbzeiten-Offset.

IV. 2. Verkopplung des Farbträgers mit dem Bildträger

Um den Farbträger mit dem Bild- bzw. Tonträger starr verkoppeln zu können, sind Teiler- bzw. Vervielfacherstufen nötig, die die Frequenzabstände $567 \cdot 1/2\, f_Z$ bzw. $704 \cdot 1/2\, f_Z$ herstellen.

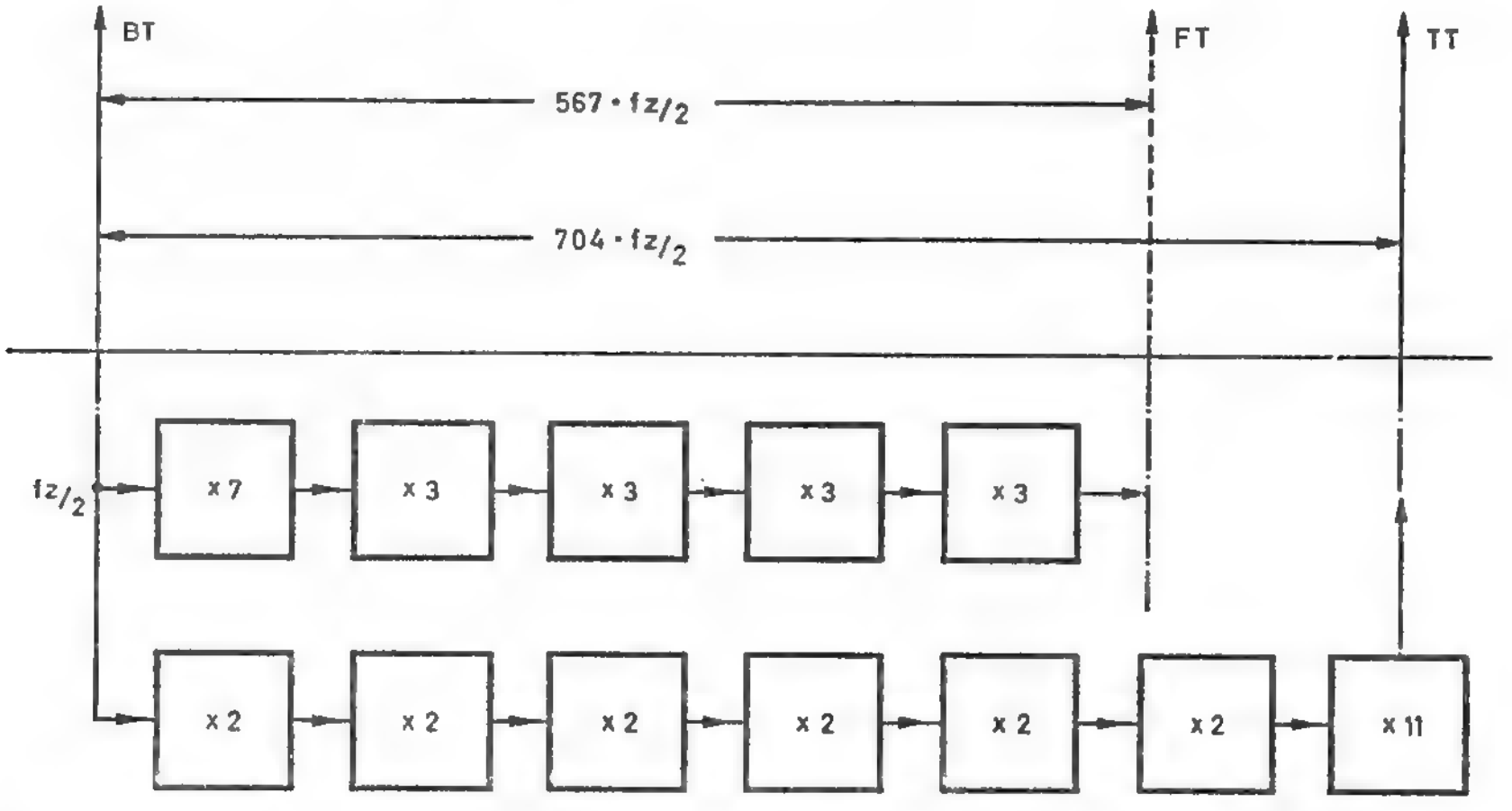


Abb. IV. 2. 1. Teilerstufen für Verkopplung des Farb- und Tonträgers mit dem Bildträger.

Daraus ergeben sich für 567 die Teilungsfaktoren 3 : 3 : 3 : 3 : 7 und für 704 die Faktoren 2 : 2 : 2 : 2 : 2 : 2 : 11. In der Abb. IV. 2. 1. ist, bezogen auf den Bildträger, für den Farb- und Tonträger das Verkopplungsschema, basierend auf der halben Horizontalfrequenz $1/2 \cdot f_Z$, angegeben. Da die Bildträger-Informationsspannung die Horizontalfrequenz als Basis

enthält, ist der Farb- und Tonträger über dieses Verkopplungsschema starr mit dem Bildträger verkoppelt und gleichzeitig besteht auch zwischen dem Farb- und Tonträger ein Frequenzabstand mit einem ungradzahligen Vielfachen der halben Horizontalfrequenz.

In Abb. IV. 2. 2. ist zusammengefaßt angegeben, wie von einem Muttergenerator abgeleitet sowohl der Farbträger als auch der Tonträger gewonnen werden kann und gleichzeitig die Taktgeberfrequenzen f_B und f_Z erhalten werden.

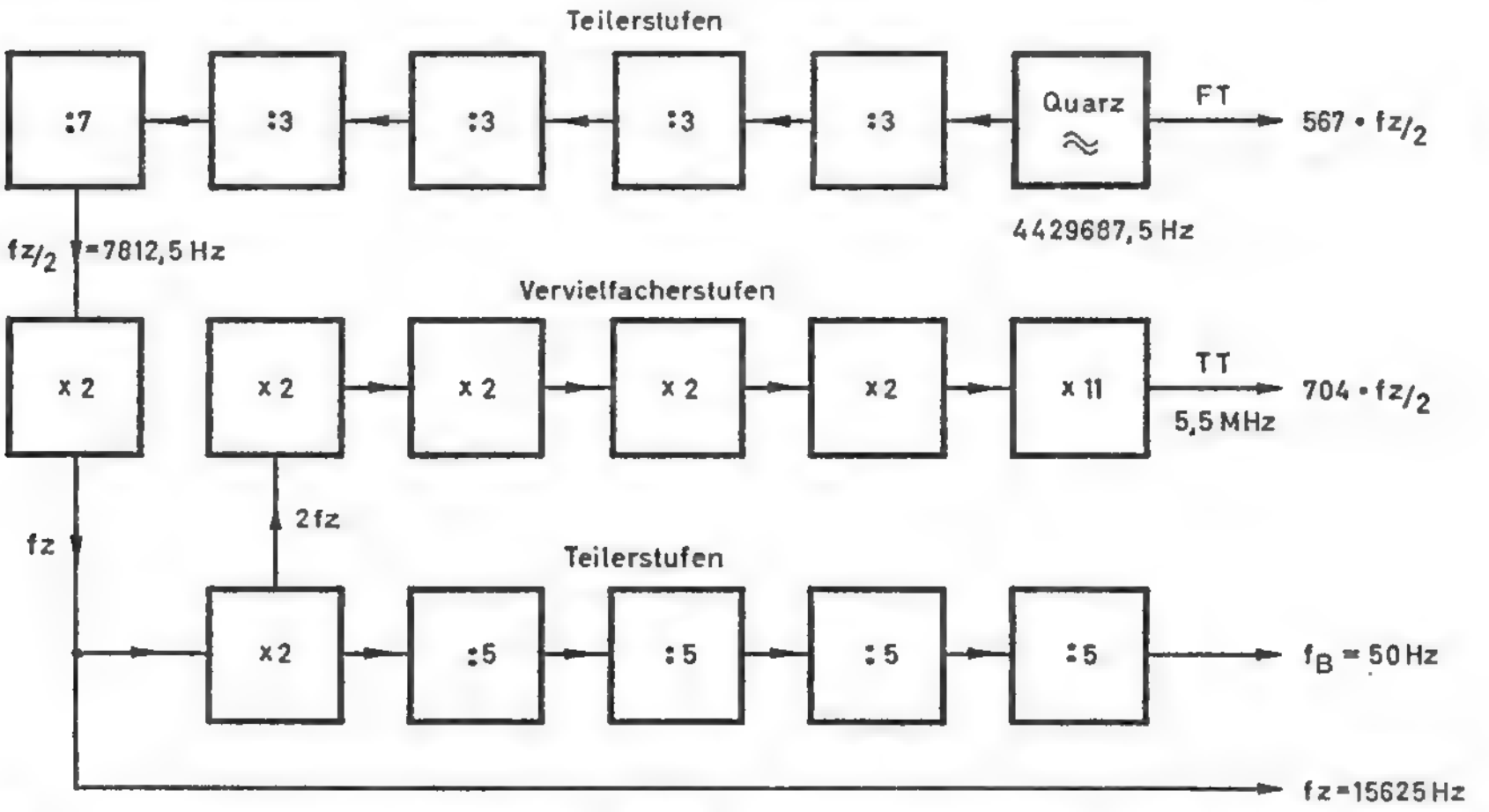


Abb. IV. 2. 2. Verkopplungsschema für Taktgeberfrequenzen mit dem Farb- und Tonträger.

Von einem Quarzoszillator als Muttergenerator ausgehend, der auf der Farbträgerfrequenz von 4 429 687,5 Hz schwingt, werden alle übrigen Frequenzen durch starre Teiler- und Vervielfacherstufen gewonnen. Zunächst wird über fünf Teilerstufen die halbe Horizontalfrequenz $1/2\ f_Z = 7\,812{,}5$ Hz abgeleitet. Dies geschieht über die Teilungsfaktoren 3 : 3 : 3 : 3 : 7. Von der halben Horizontalfrequenz $1/2\ f_Z$ wird dann über eine Verdopplerstufe die Horizontalfrequenz f_Z erzeugt. Eine weitere Verdopplerstufe liefert die doppelte Horizontalfrequenz, von der aus über vier Teilerstufen mit jeweils dem Faktor 5 die Rasterfrequenz $f_B = 50$ Hz gewonnen wird.

Die letzte Verdopplerstufe und die vier Teilerstufen mit dem Faktor 625 stellen den bisher üblichen Taktgeber eines Schwarz/Weiß-Fernsehsenders dar. Er enthält einen Muttergenerator mit doppelter Horizontalfrequenz, von der durch den Faktor 2 die Horizontalfrequenz f_Z und über die vier Teilerstufen mit dem Faktor 625 die Rasterfrequenz f_B abgeleitet wird.

Von der doppelten Horizontalfrequenz ausgehend, folgen dann noch weitere vier Verdopplerstufen und eine Vervielfacherstufe mit dem Faktor 11. Hiernach erhält man die Tonträgerfrequenz von 5,5 MHz, die von der halben Horizontalfrequenz ausgehend aus $704 \cdot 1/2\ f_Z$ besteht. Nach diesem Grundschema sind also über die Taktgeberfrequenz f_B und f_Z der Farb- und Tonträger starr mit dem Bildträger verkoppelt.

Experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, daß eine weitere Reduzierung der verbleibenden Interferenzstörungen möglich ist, wenn man statt des amerikanischen Halbzeilen-Offsetverfahrens ein sogenanntes Präzisions-Offsetverfahren anwendet. Diesem Präzisions-Offsetverfahren liegt zugrunde, daß eine Interferenzstörung dann am wenigsten stört, wenn das Störmuster sich auf dem Bildschirm nicht bewegt. Dies ist nur dann der Fall, wenn der Farbträger aus einem ganzzahligen Vielfachen der Bildfrequenz besteht. Gleichzeitig darf der Farbträger dabei jedoch nicht aus einem Vielfachen der Horizontalfrequenz bestehen, wobei zwar auch dann das Störmuster stillsteht, jedoch besonders auffällig wird, weil es aus senkrechten Streifen besteht. Besonders geringe Interferenzstörungen treten dann auf, wenn für die Verkopplung etwa ein Drittel der Horizontalfrequenz als Basis gewählt wird. Mit einem Fünftel der Horizontalfrequenz als Verkopplungsbasis kann man gleich gute Ergebnisse erzielen. Der erste Fall wird als 1/3-Präzisionsoffset und der zweite Fall als 1/5-Präzisionsoffset bezeichnet. Der 1/5-Präzisionsoffset läßt sich nach dem gleichen Grundprinzip durch Teiler- und Vervielfacherstufen wie beim Halbzeilen-Offset verwirklichen, da unsere Horizontalfrequenz von 15 625 Hz sich durch 5 teilen läßt und gleichzeitig ein Vielfaches der Bildfrequenz von

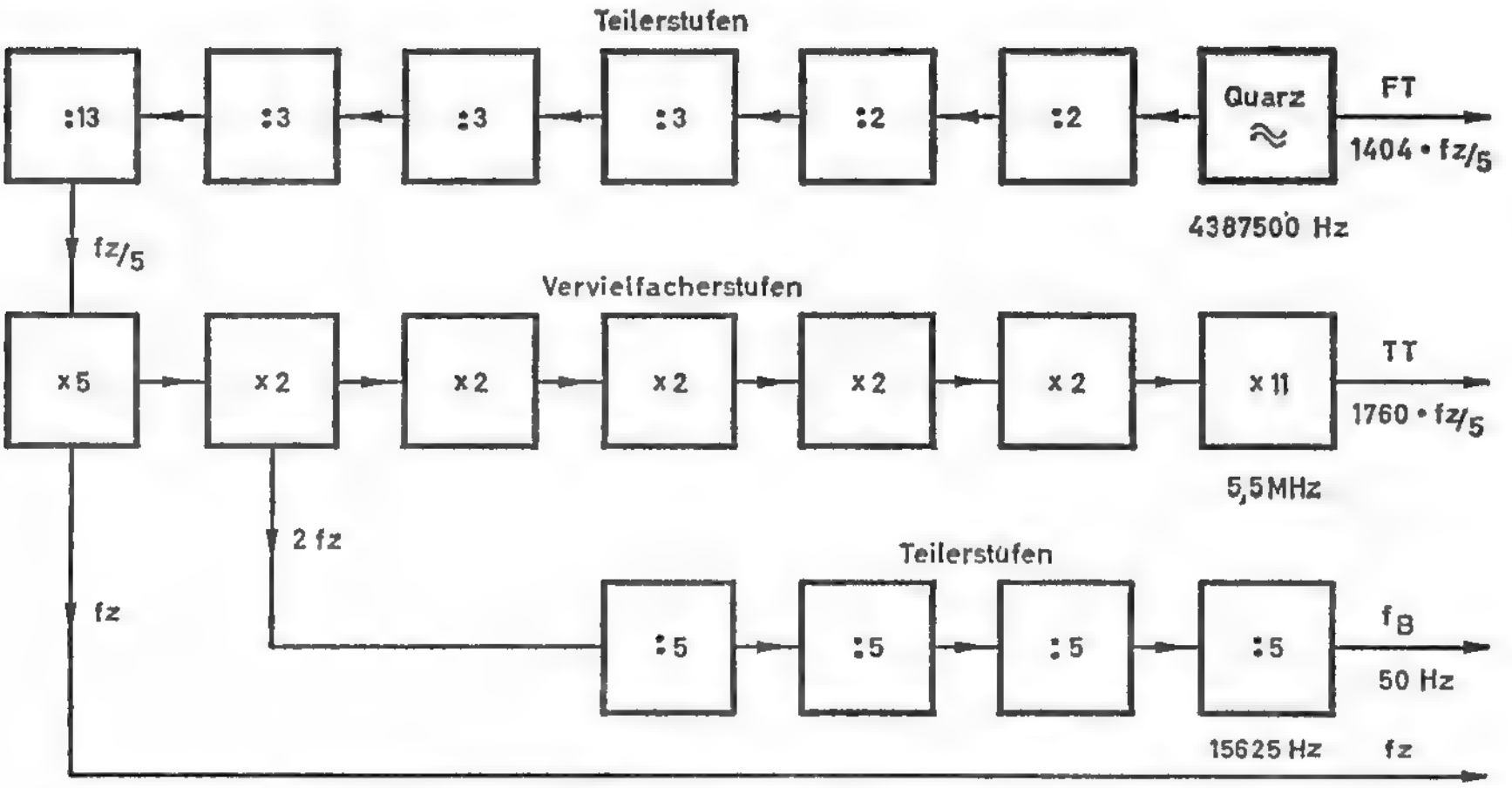


Abb. IV. 2. 3. Verkopplungsschema für das 1/5-Präzisions-Offset-Verfahren.

25 Hz bleibt. Eine mögliche Frequenzwahl beim 1/5-Präzisionsoffset für den Farbträger wäre 4,3875 MHz. Das hierfür notwendige Verkopplungsschema gibt Abb. IV. 2. 3. an.

Es wird vom Muttergenerator mit 4,3875 MHz ausgehend über 6 Teilerstufen 1/5 f_Z abgeleitet. Nach der Vervielfältigung auf f_Z bzw. 2 f_Z für die Taktgeberfrequenzen wird dann wie beim Halbzeilen-Offset der Tonträger mit 5,5 MHz gebildet.

Nicht ganz so einfach läßt sich die Verkopplung beim 1/3-Präzisionsoffset durchführen. Da sich die Horizontalfrequenz von 15 625 Hz nicht durch 3 teilen läßt, muß für das Verkopplungsschema entweder neben den Teiler- und Vervielfacherstufen ein Mischprinzip mit der Aussiebung bestimmter Frequenzen oder aber die Nachregelung eines Oszillators mit einer Reaktanzröhre vorgenommen werden. Für beide Arten der Verkopplung beim 1/3-Präzisionsoffset wäre eine Farbträgerfrequenz von 4,4271 MHz möglich.

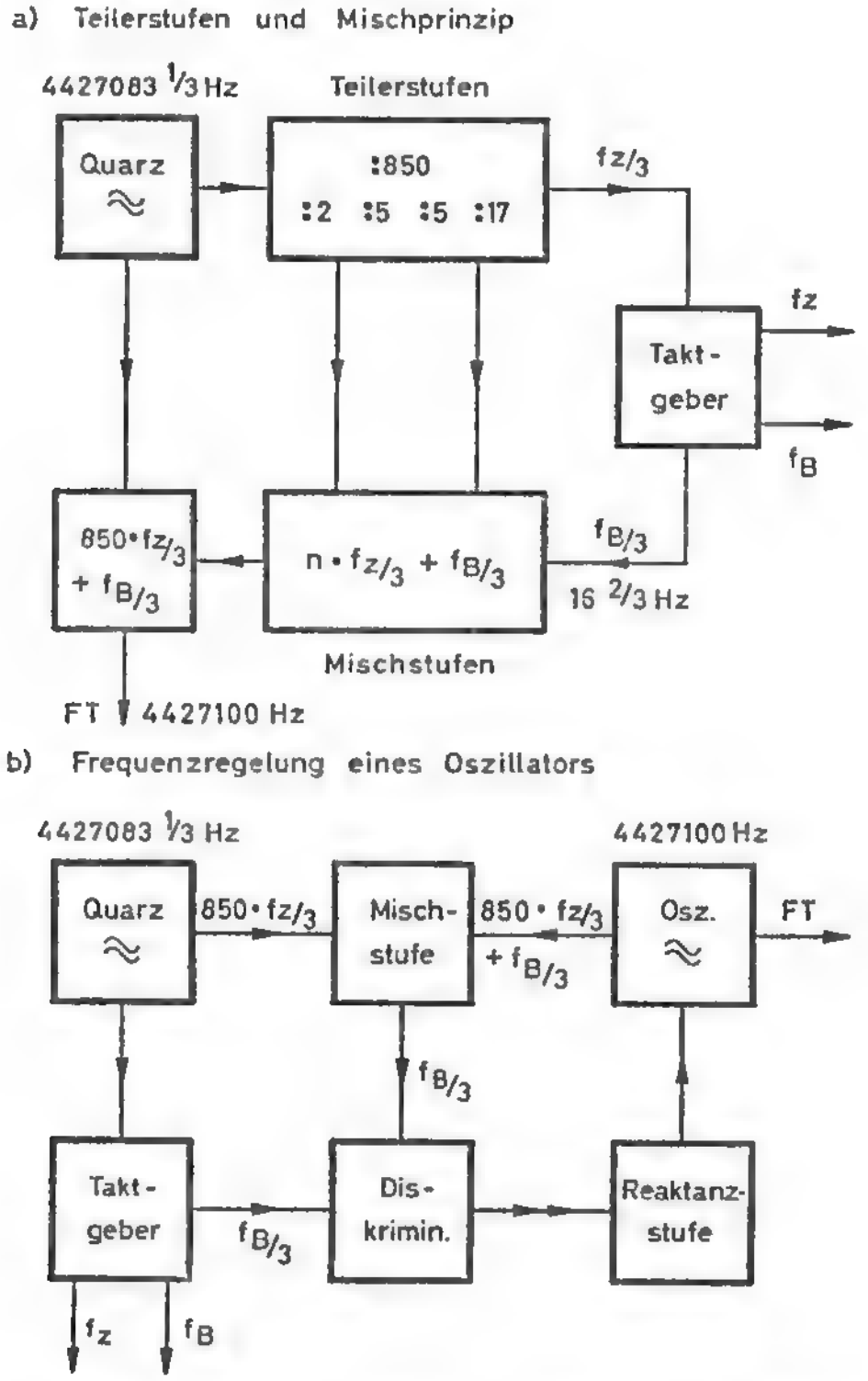


Abb. IV. 2. 4. Verkopplungsschemen für das 1/3-Präzisions-Offset-Verfahren.

In Abb. IV. 2. 4. ist sowohl für die Methode der Verkopplung mit Teilerstufen und Mischung, als auch für die Nachregelung eines Oszillators über einen Diskriminator mit Reaktanzröhre das Grundprinzip angedeutet. Bei der Anordnung von Teilerstufen mit der gleichzeitigen Mischung wird von einem Quarz-Oszillator die Grundfrequenz 4 427 083 1/3 Hz erzeugt. Diese Frequenz läßt sich über Teilerstufen mit dem Gesamtfaktor 850, bestehend aus den Einzelfaktoren 2 : 5 : 5 : 17, auf 1/3 f_Z herunterteilen. Vom mitverkoppelten Taktgeber wird die Bildfrequenz f_B durch einen Teiler auf 1/3 f_B gebracht und zusammen mit 1/3 f_Z über fortlaufende Mischstufen bis zur Trägerfrequenz 4 427 100 Hz heraufgemischt. Die Mischstufen arbeiten hier jeweils so, daß zum vorhandenen Vielfachen der 1/3 Horizontalfrequenz 1/3 f_B addiert wird. Die Addition mit der Frequenz 1/3 f_B ist erforderlich, um aus 1/3 f_Z eine durch die Bildfrequenz f_B = 25 Hz teilbare Zahl zu machen. Da 1/3 f_Z = 5 208 1/3 Hz ergibt, ist die nächste durch 25 teilbare Frequenz 1/3 f_Z + 1/3 f_B = 5 208 1/3 Hz + 16 2/3 Hz = 5 225 Hz. Der Farbträger mit seiner Frequenz 4 427 100 Hz besteht also aus 850 · 1/3 f_Z + 1/3 f_B.

Bei der zweiten Methode mit der Nachregelung eines Oszillators über eine Reaktanzröhre benutzt man wiederum einen Quarz-Oszillator, der auf der Frequenz 4 427 083 1/3 Hz schwingt, also dem 850-fachen von 1/3 f_Z.

Ein zweiter nachregelbarer Oszillator schwingt auf der gewünschten Farbträgerfrequenz von 4 427 100 Hz, also auf 850 · 1/3 f_Z + 1/3 f_B. Die starre Verkopplung wird jetzt dadurch erreicht, daß vom Quarz-Oszillator über den angeschlossenen Taktgeber die Frequenz 1/3 f_B einer Diskriminatorschaltung zugeführt wird. Gleichzeitig erhält dieser Diskriminator aus einer Mischstufe die Differenzfrequenz aus Quarz-Oszillator und Farbträger-Oszillator. Hat der Farbträger-Oszillator seine Soll-Frequenz, so beträgt diese Differenzfrequenz gleichfalls 1/3 f_B und es wird keine Regelspannung erzeugt. Bei Frequenzabweichung des Farbträger-Oszillators liefert der Diskriminator eine Regelspannung, die über eine Reaktanzröhrenschaltung den Farbträger-Oszillator nachregelt und ihn frequenz- und phasenstarr auf seiner Soll-Frequenz festhält.

Zusammenfassung

Zur Reduzierung der Interferenzstörungen zwischen dem Farbträger und dem Bild- bzw. Tonträger muß der Farbträger eine Frequenz haben, die so beschaffen ist, daß bei zwei aufeinanderfolgenden Bildrastern die Helligkeitseindrücke gegenphasig sind, so daß durch die Integrationswirkung des Auges eine Auslöschung erfolgen kann. Grundsätzlich läßt sich dies bei jeder Farbträgerfrequenz erreichen, wenn zu Beginn jeden Bildes eine

Phasenumschaltung von 180° erfolgt. Der einfachste Fall der gegenphasigen Auslöschung ist beim sogenannten Halbzeilen-Offset gegeben. Hierfür muß eine Farbträgerfrequenz gewählt werden, die ein ungradzahliges Vielfaches der halben Horizontalfrequenz ist. In der Nähe von 4,4 MHz liegt die nächste geeignete Frequenz bei 4 429 687,5 Hz. Sie besteht aus $567 \cdot 1/2\ f_Z$. Betrachtet man das Frequenzspektrum eines modulierten Bildträgers, so findet HF-mäßig als Seitenbänder des Bildträgers eine starke Häufung in Abständen mit der Horizontalfrequenz statt. Zwischen diesen Frequenzhäufungen gibt es Lücken, die nur eine geringe Informationsspannung enthalten. Genau in diese Lücken fällt die Farbträgerinformation beim Halbzeilen-Offset. Für die Verkopplung des Farbträgers mit dem Bild- bzw. Tonträger sind Teiler- und Vervielfacherstufen nötig. Über den Taktgeber wird nach einem derartigen Verkopplungsschema die Vertikal- und Horizontalfrequenz mit dem Farb- und Tonträger starr verkoppelt. Eine Steigerung zur Verminderung der Interferenzstörung ist durch die Wahl eines sogenannten Präzisions-Offsetverfahrens möglich. Hierbei besteht der Farbträger aus einem Vielfachen der Bildfrequenz und kann entweder aus $1/3\ f_Z$ bzw. $1/5\ f_Z$ abgeleitet werden. Besonders gering sind die Störungen beim 1/3-Präzisions-Offset, wobei jedoch keine einfache Verkopplung über Teilerstufen mehr möglich ist, da die Horizontalfrequenz keinen Teiler mit dem Faktor 3 enthält. Man muß bei dieser Verkopplung Mischstufen bzw. die Nachregelung eines Oszillators mit Hilfe einer Reaktanzröhre anwenden.

KAPITEL V

MODULATIONSTECHNIK DES FARBTRÄGERS

Übersicht

Das Farbartsignal, welches aus zwei voneinander unabhängigen Informationsspannungen besteht, muß in der Weise einem Träger aufmoduliert werden, daß keine gegenseitige Beeinflussung stattfindet und eine spätere einwandfreie Trennung im Empfänger wieder möglich ist. Dies läßt sich durch eine Zweiphasenmodulation erzielen. Um Interferenzstörungen im Empfänger zu vermeiden, wird der Träger selbst nicht mitausgestrahlt. Die Zweiphasenmodulation besteht dabei aus zwei um 90° gegeneinander versetzten Amplitudenmodulationen. Nachfolgend werden deshalb zunächst die Grundlagen der Amplitudenmodulation erklärt. Es wird gezeigt, daß sich die Amplitudenmodulation in Form eines in der Amplitude schwankenden Trägers oder aber als Addition eines Trägers mit zwei Seitenbändern darstellen läßt. Daneben wird das Modulationsprodukt ohne Träger betrachtet und in vektorieller Addition der Phasensprung erläutert.

Anschließend wird dann am Beispiel eines einfachen Röhrenmodulators gezeigt, daß in einer Gegentaktschaltung im Ausgangssignal sowohl die Informationsspannung als auch der Träger unterdrückt werden kann. Man

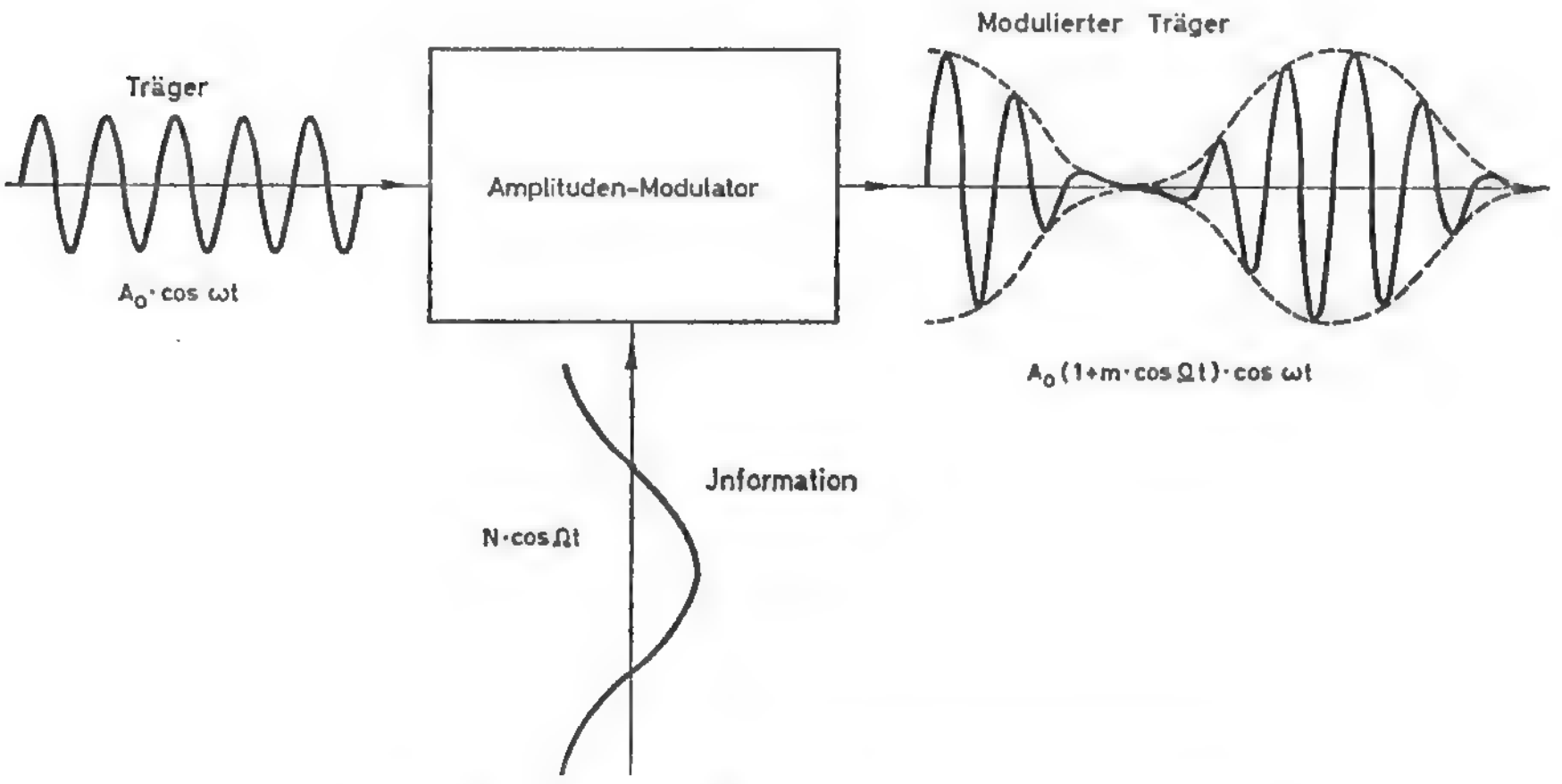


Abb. V. 1. 1. Schema eines Amplituden-Modulators.

kommt somit zu einer Modulatorschaltung, bei der das Ausgangssignal nur noch aus dem Modulationsprodukt besteht. Für die Zusammensetzung des Modulationsproduktes wird neben der Vektordarstellung auch die Abbildung der Schwingungszüge gewählt, da die genaue Kenntnis der Form des Modulationsproduktes die Voraussetzung für das Verständnis der Synchrongleichrichtung im Empfänger ist. Durch die Zusammenschaltung zweier um 90° gegeneinander versetzter Gegentaktmodulatoren mit gemeinsamen Ausgang erhält man ein Summensignal, in dem zwei voneinander unabhängige Informationsspannungen enthalten sind. Auch hier wird neben der vektoriellen Darstellung an einem Beispiel die Bildung der Summenschwingung als Addition der beiden Modulationsprodukte gezeigt.

V. 1. Grundlagen der Amplitudenmodulation

Unter Modulation ganz allgemein versteht man in der HF-Technik die Beeinflussung eines Trägers A (ω) mit einer Information N (Ω). Hierdurch wird es möglich, die niederfrequente Information N (Ω) drahtlos zu übertragen. Ein hochfrequenter Träger A (ω) läßt sich in der allgemeinen Form $A = A_0 \cdot \cos(\omega t + \varphi)$ darstellen. Als beeinflußbare und veränderliche Größen sind hierin die Trägeramplitude A_0, die Kreisfrequenz ω und der Phasenwinkel φ vorhanden. Wird die Trägeramplitude A_0 proportional einer Information N verändert, so liegt Amplitudenmodulation vor. Beeinflußt man die Kreisfrequenz ω mit der Information N, so spricht man von Frequenzmodulation und variiert man den Phasenwinkel φ proportional der Information N, erhält man Phasenmodulation. Nachfolgend wollen wir uns aber nur mit der Amplitudenmodulation beschäftigen. Hierbei spielt der Phasenwinkel keine Rolle und gibt nur die Anfangsphase der Trägerschwingung an, so daß in der Darstellung der Trägerschwingung nachfolgend der Phasenwinkel φ fortgelassen wird ($\varphi = 0$). Es sei vorweg darauf hingewiesen, daß trotz der Bezeichnung „Zweiphasenmodulation" für die Farbartmodulation des Farbträgers keine Phasenmodulation im eigentlichen Sinne vorliegt. Es ergibt sich lediglich durch die Addition zweier um 90° versetzter Amplitudenmodulationen eine Phasenbeziehung zwischen den beiden Modulationsprodukten.

In Abb. V. 1. 1. ist das Grundprinzip eines AM-Modulators dargestellt. Ein Träger in der Form $A_0 \cdot \cos \omega t$ durchläuft den Modulator, dessen Verstärkung direkt proportional von der Information $N \cdot \cos \Omega t$ gesteuert wird. Hierbei soll es für uns in diesem Abschnitt von untergeordneter Bedeutung sein, wie man technisch die Steuerung des Modulators ausführt. Das Ausgangsprodukt des Modulators wird eine hochfrequente Trägerschwingung sein, deren Amplituden im Rhythmus der niederfrequenten Information

schwanken. Bei der Wahl eines 100%igen Modulationsgrades $m = 1$ schwankt dabei die Trägeramplitude A von 200% bis 0% um den Mittelwert $A_0 = 100\%$. Der Modulationsgrad m stellt hierbei das Verhältnis von N/A_0 dar. Da im Modulator die Trägeramplitude mit der niederfrequenten Information N vergrößert oder verkleinert wird, liegt eine multiplikative Beeinflussung vor. Die Trägeramplitude A_0 wird also mit dem Faktor $(1 + m \cos \Omega t)$ vergrößert bzw. verkleinert. Das Ausgangssignal läßt sich daher in der Form $A_0 (1 + m \cdot \cos \Omega t) \cdot \cos \omega t$ schreiben und ist eine hochfrequente Trägerschwingung mit konstanter Frequenz ω, deren Amplitude sich zeitlich mit der niederfrequenten Information N verändert.

Versucht man, diese Spannungsformen vektormäßig darzustellen, so ergibt sich für den unmodulierten Träger $A_0 \cdot \cos \omega t$ ein Zeiger mit der Amplitudengröße A_0, der mit der Kreisfrequenz ω rotiert. Die Projektionen dieses Vektors auf der X- bzw. Y-Achse ergeben den zeitlichen Ablauf des Schwingungszuges.

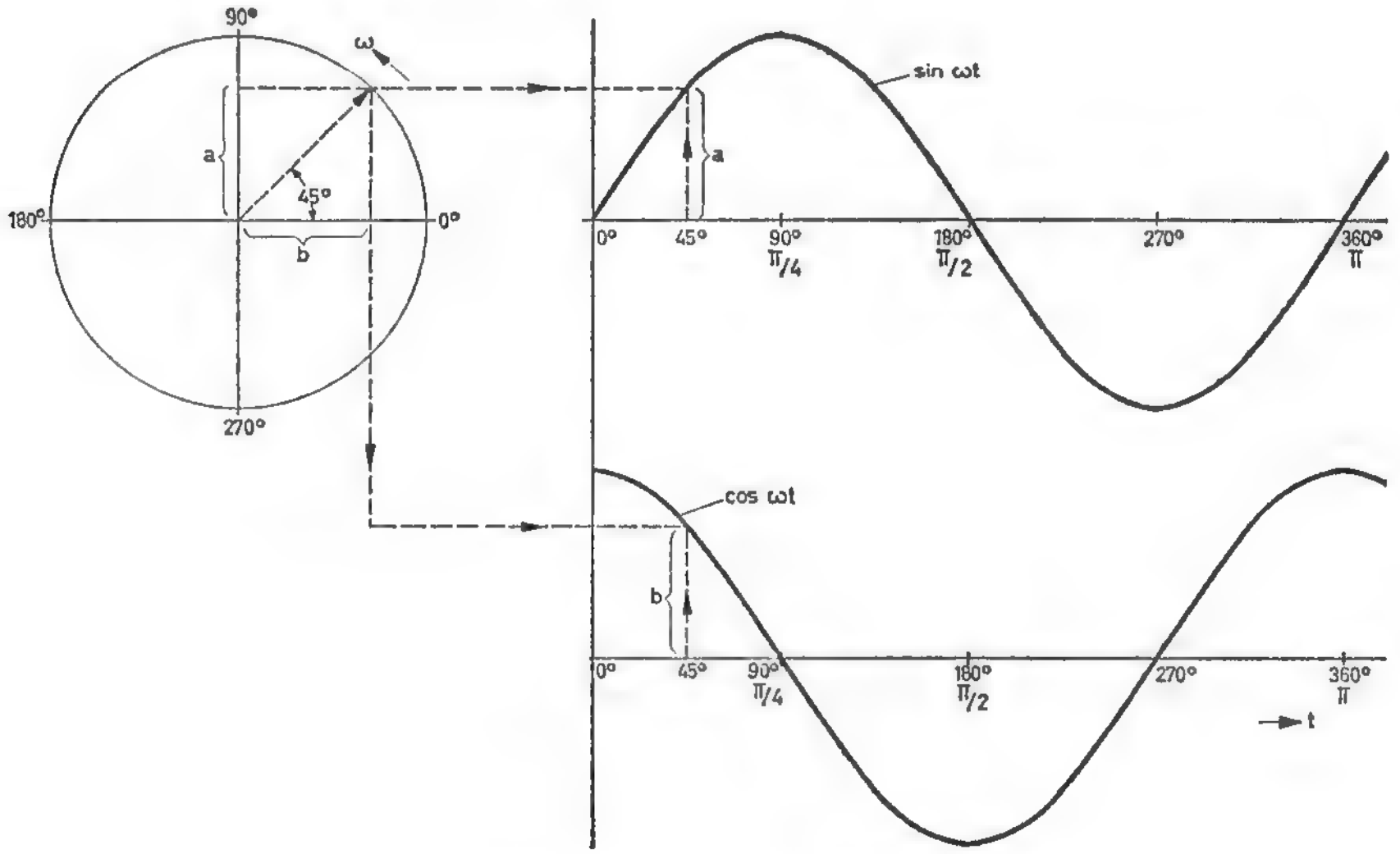


Abb. V. 1. 2. Darstellung der Sinus- und Cosinusschwingung durch einen rotierenden Vektor.

In Abb. V. 1. 2. ist dies dargestellt und man erhält die bekannten Sinus- bzw. Cosinusschwingungen. Will man in ähnlicher Weise einen amplitudenmodulierten Träger darstellen, so muß der rotierende Vektor A_0 des Trägers seine Amplitude im Rhythmus der niederfrequenten Information N verändern. Die amplitudenmäßige Veränderung eines Vektors kann aber durch einen zusätzlichen zweiten Vektor dargestellt werden. Da die Fre-

quenz des amplitudenmodulierten Trägers konstant bleiben muß, darf der erforderliche zweite Vektor auch immer nur die Richtung des Vektors A_0 aufweisen. Dies läßt sich erreichen, wenn zwei gegen den Trägervektor gegenläufige Vektoren gewählt werden, die jeweils um die Frequenz der niederfrequenten Information Ω höher bzw. niedriger liegen als die Trägerfrequenz ω. Dies ergibt also zwei Vektoren mit den Frequenzen $\omega + \Omega$ und $\omega - \Omega$. Zur übersichtlicheren Darstellung ist in Abb. V. 1. 3. der Trägervektor A_0 als ruhender Bezugsvektor gezeichnet, so daß die beiden zusätzlichen Vektoren mit der Niederfrequenz Ω vor- bzw. nacheilend um die Amplitudenspitze des Trägers A_0 rotieren.

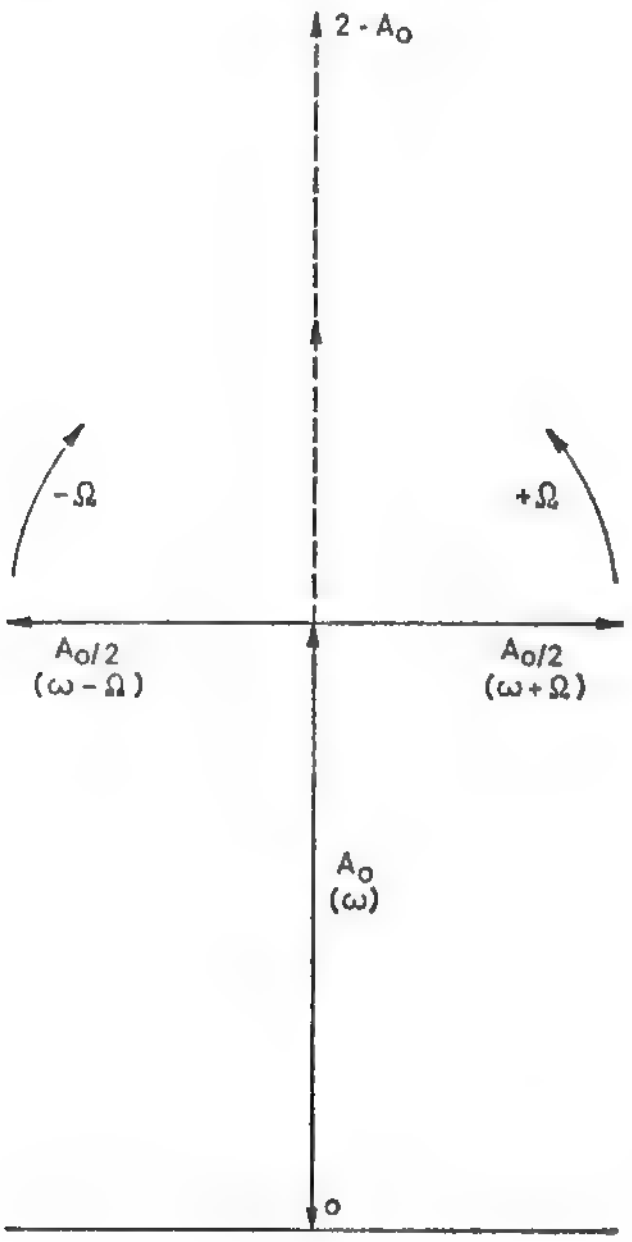


Abb. V. 1. 3. Vektordarstellung des AM-Trägers.

Die vektorielle Summe der beiden Zusatzvektoren fällt damit immer in die Vektorrichtung des Trägers A_0 und ergibt eine Amplitudenbeeinflussung des Trägers mit der Niederfrequenz. Bei unserer Darstellung mit 100%iger Modulationstiefe m haben diese beiden Zusatzvektoren jeweils die Amplitudengröße $A_0/2$, so daß die Trägeramplitude zwischen 200% und 0% schwankt. Mit dieser Vektorendarstellung kann man also ganz eindeutig einen HF-Träger mit der konstanten Frequenz ω abbilden, dessen Amplitude mit der Information Ω schwankt. Aus der Vektordarstellung ist aber auch ersichtlich, daß wir es neben dem Träger A_0 mit seiner Fre-

quenz ω noch mit zwei weiteren Frequenzen $\omega + \Omega$ und $\omega - \Omega$ zu tun haben, die die Amplitudengröße $A_0/2$ besitzen. Dies bedeutet, daß bei der Amplitudenmodulation im Modulator neben dem Träger zwei neue Frequenzen entstehen, die symmetrisch zum Träger liegen und frequenzmäßig den Abstand Ω besitzen. Diese beiden neuen Frequenzen werden als Seitenbänder bezeichnet.

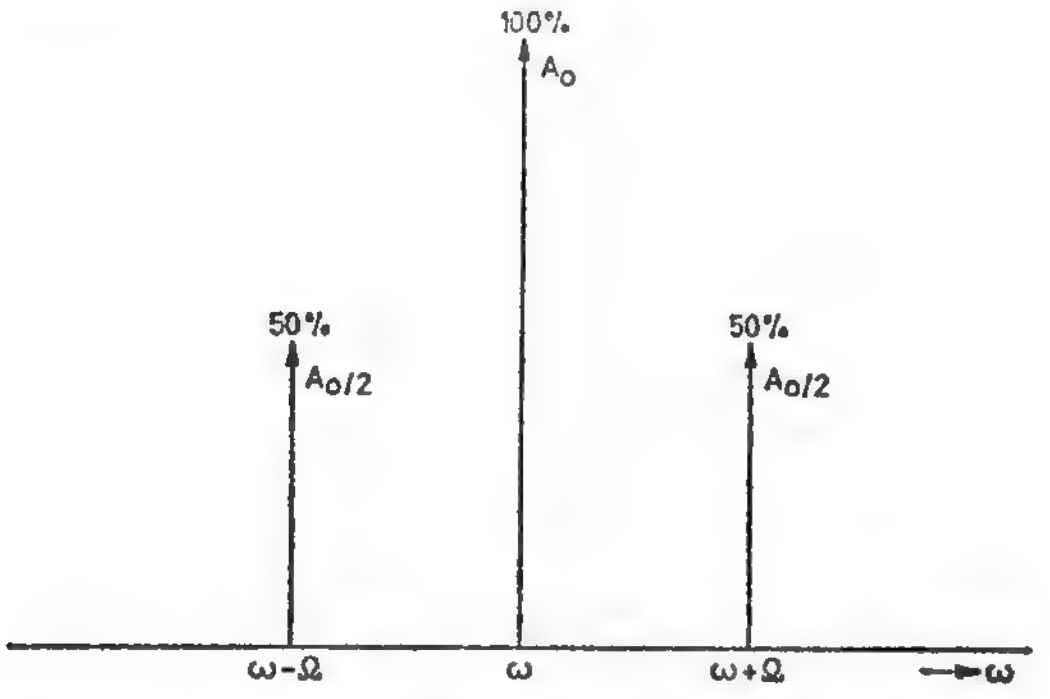


Abb. V. 1. 4. Vektordarstellung der Seitenbänder.

In Abb. V. 1. 4. sind die drei Frequenzen in Vektordarstellung amplitudenmäßig eingetragen. Es hat also der Träger die Form A_0 (ω) und die beiden Seitenbänder $A_0/2$ ($\omega + \Omega$) bzw. $A_0/2$ ($\omega - \Omega$).

Will man die zu dieser Vektordarstellung gehörenden Schwingungszüge selbst darstellen, so muß man auch aus der Trägerschwingung ω und den beiden Seitenbandfrequenzen $\omega - \Omega$ und $\omega + \Omega$ additionsmäßig die amplitudenmodulierte Trägerschwingung bilden können.

In Abb. V. 1. 5. ist dies graphisch dargestellt. Die Frequenzen sind so gewählt, daß das Verhältnis zwischen Trägerschwingung und Niederfrequenz 5 : 1 beträgt. Damit ergibt sich für die beiden entstehenden Seitenbandfrequenzen ein Frequenzverhältnis von 4 : 6, nämlich $\omega + \Omega = 6$ und $\omega - \Omega = 4$. Selbstverständlich besteht in der Praxis ein wesentlich größeres Frequenzverhältnis zwischen Träger- und Informationsspannung. In unseren Beispielen ist das Frequenzverhältnis nur so niedrig gewählt, um die Schwingungszüge deutlicher darstellen zu können. Es ist in Abb. V. 1. 5a. die mit der Information $N \cdot \cos \Omega t$ amplitudenmodulierte Trägerschwingung $A_0 \cdot \cos \omega t$ abgebildet. Gemäß unserer Vektordarstellung muß sich die in der Amplitude schwankende Trägerschwingung additiv aus den drei Schwingungen $A_0 \cdot \cos \omega t$; $A_0/2 \cdot \cos (\omega + \Omega)\ t$ und $A_0/2 \cdot \cos (\omega - \Omega)\ t$ zusammensetzen. Diese drei Schwingungen sind in Abb. V. 1. 5b. eingezeichnet und ergeben addiert die in Abb. V. 1. 5a. dargestellte Summen-

schwingung. Addiert man nur die beiden Seitenbandfrequenzen $A_0/2 \cdot \cos(\omega + \Omega)\, t$ und $A_0/2 \cdot \cos(\omega - \Omega)\, t$, so ergibt sich das Bild der Abb. V. 1. 5c. Das Ergebnis stellt das sogenannte Modulationsprodukt dar, d.h. die Summe der bei der Amplitudenmodulation entstehenden Seitenbänder ohne die Trägerschwingung. In diesem Modulationsprodukt steckt also die niederfrequente Information, während der amplitudenkonstante Träger nur als Hilfsmittel zur leichteren Demodulation am Empfangsort mit ausgestrahlt wird. Man kann, wie wir in Kapitel IX sehen werden, auf die senderseitige Ausstrahlung der konstanten Trägerschwingung ω völlig verzichten, wenn der Empfänger eine spezielle Gleichrichterschaltung besitzt.

Das Modulationsprodukt besteht zunächst wiederum aus einer in der Amplitude schwankenden Schwingung, deren Nulldurchgänge den Abstand der Frequenz ω aufweisen. Die Umhüllende, in der die Niederfrequenz Ω enthalten ist, geht durch Null und läßt sich daher mit einfachen AM-Gleichrichterschaltungen nicht wiedergewinnen.

Das Modulationsprodukt als Addition der beiden Seitenbandfrequenzen kann man auch als eine Schwebung zweier Frequenzen ansehen. Bei der

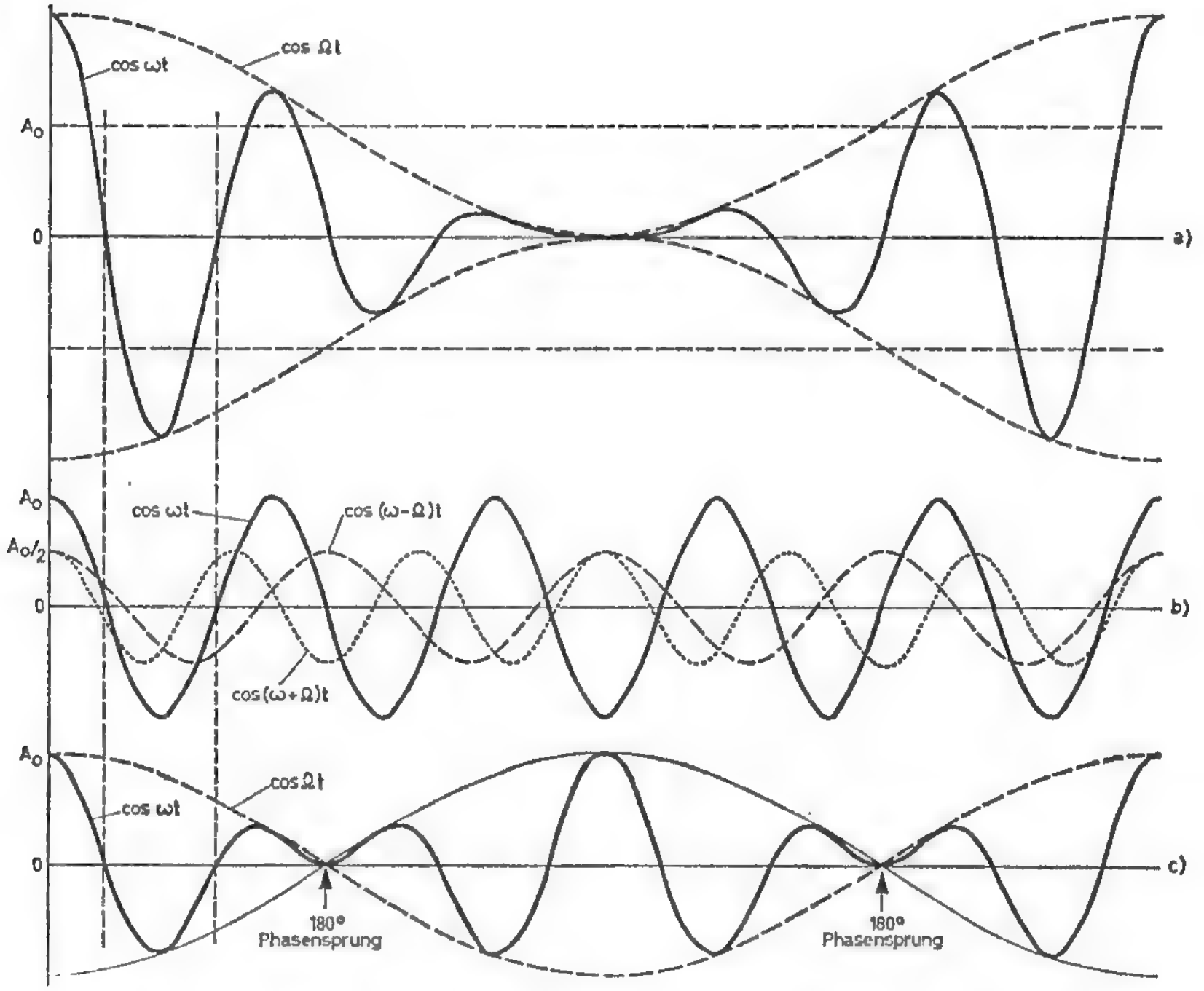


Abb. V. 1. 5. Schwingungszüge eines AM-Trägers (cos ωt; cos Ωt).

Schwebung von zwei Frequenzen entsteht als Summenspannung eine neue Frequenz, die aus der halben Summe der beiden ursprünglichen Frequenzen besteht und deren Umhüllende mit der halben Differenz der beiden Frequenzen schwankt. Wir erhalten also aus den beiden Seitenbandfrequenzen $(\omega + \Omega)$ und $(\omega - \Omega)$ die halbe Summenfrequenz $1/2\,((\omega + \Omega) + (\omega - \Omega)) = \omega$ und die halbe Differenzfrequenz

$$1/2\,((\omega + \Omega) - (\omega - \Omega)) = \Omega.$$

Man kann also eine amplitudenmodulierte Trägerschwingung aus einer amplitudenkonstanten Trägerschwingung ω und einem in der Amplitude mit der Niederfrequenz Ω schwankenden Modulationsprodukt zusammensetzen, wobei das Modulationsprodukt aus der Schwebung der beiden Seitenbandfrequenzen $\omega + \Omega$ und $\omega - \Omega$ besteht.

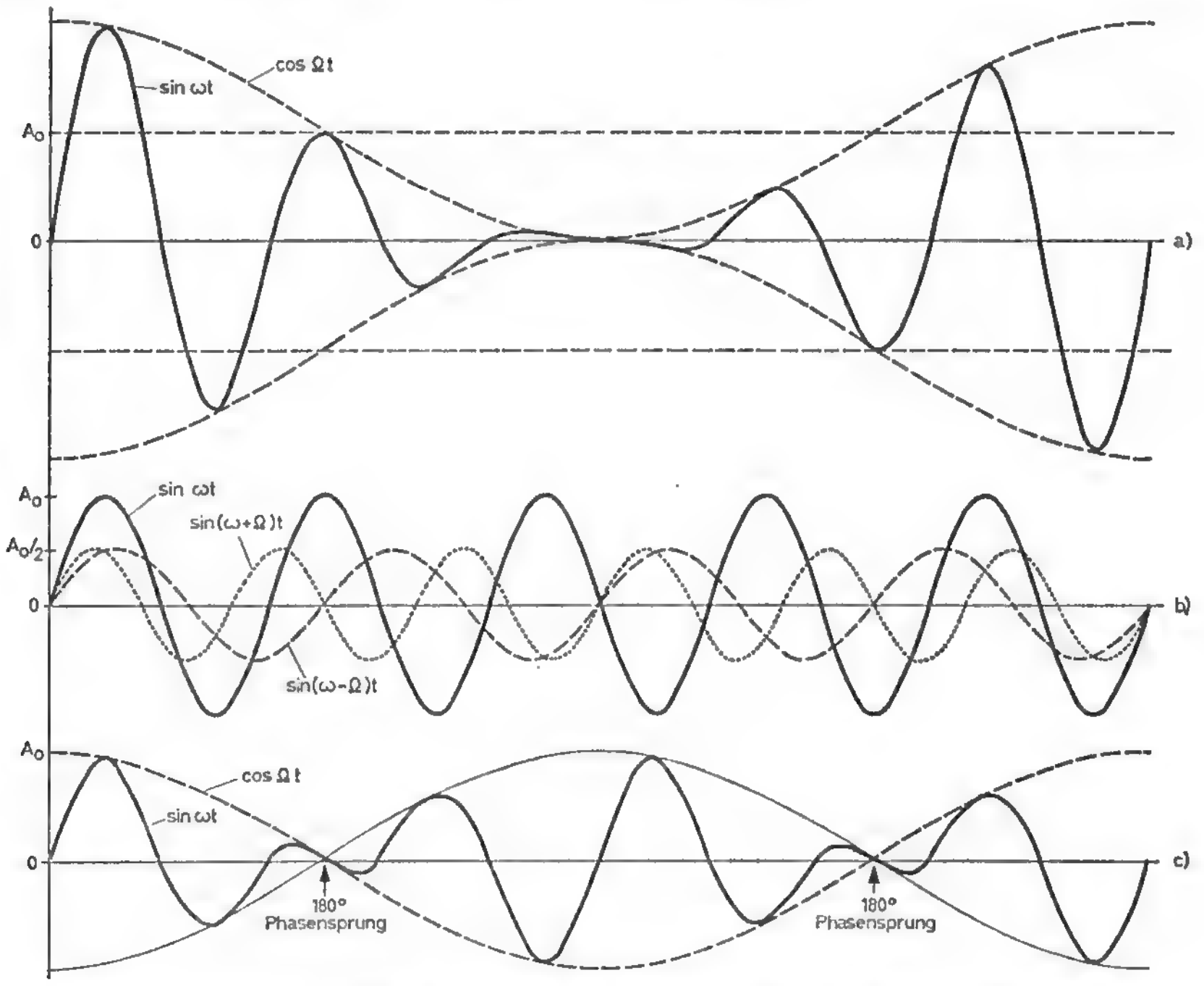


Abb. V. 1. 6. Schwingungszüge eines AM-Trägers (sin ωt; cos Ωt).

Ein sehr bemerkenswerter Punkt ist der im Modulationsprodukt beim Nulldurchgang der Umhüllenden stattfindende Phasensprung von 180°. Wenn auch der Schwingungszug des Modulationsproduktes durch seine Nulldurchgänge die Frequenz ω des Trägers enthält, so besteht durch den Phasensprung beim Nulldurchgang der Umhüllenden zwischen dem

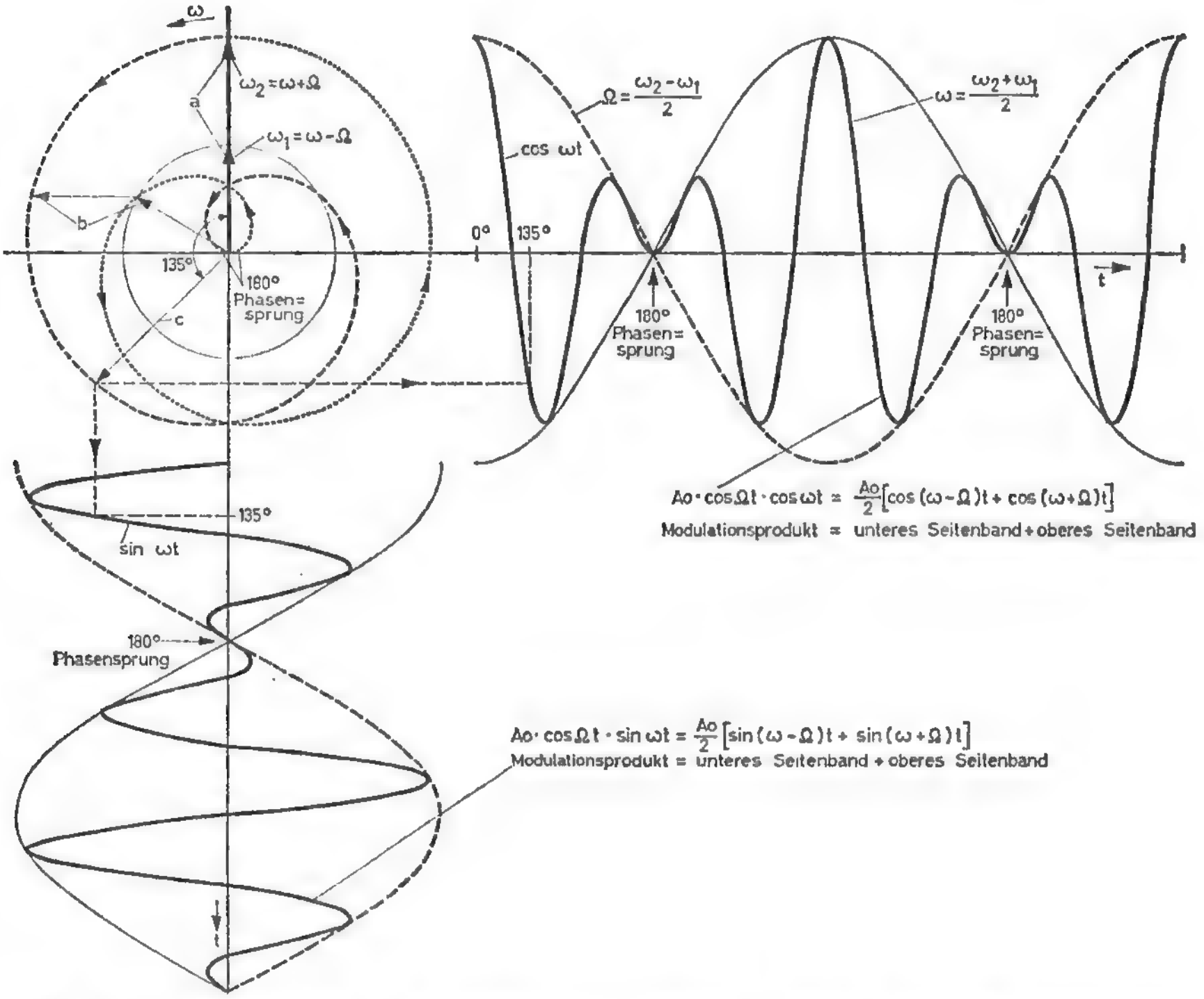


Abb. V. 1. 7. Darstellung der Modulationsprodukte durch rotierende Seitenbandvektoren.

Schwingungszug vor bzw. nach dem Nulldurchgang ein Phasenunterschied von 180°. Dieser Phasensprung von 180° kann zwar amplitudenmäßig unterschiedlich verlaufen, findet jedoch in jedem Fall statt, unabhängig davon, welche Phasenlage zwischen der Trägerschwingung ω und der Niederfrequenz Ω besteht.

Um dies zu zeigen ist deshalb, im Gegensatz zur Abb. V. 1. 5., in Abb. V. 1. 6. die Modulation eines Trägers mit der Phasenlage sin ωt und den dazugehörigen Seitenbändern dargestellt. Man erkennt auch hier, daß bei der Addition der beiden Seitenbänder sin $(\omega + \Omega)\ t$ und sin $(\omega - \Omega)\ t$ wiederum beim Nulldurchgang der Umhüllenden der Phasensprung von 180° auftritt. Während in Abb. V. 1. 5. ohne den Phasensprung der Schwingungszug des Modulationsproduktes durch Null ins Negative laufen müßte, ist in Abb. V. 1. 6. zu erkennen, daß der Schwingungszug, statt im Positiven zu verbleiben, durch Null ins Negative geht.

Da das Modulationsprodukt aus der Addition der beiden Seitenband-

frequenzen $\omega + \Omega$ und $\omega - \Omega$ besteht, kann man die Addition auch in Vektordarstellung ausführen. Die beiden Seitenbandfrequenzen $\omega + \Omega$ und $\omega - \Omega$ sind in Abb. V. 1. 7. mit ω_2 bzw. ω_1 bezeichnet.

Zum Ausgangspunkt $t = 0$ haben die beiden Vektoren gleiche Richtungen (Fall *a*) und addieren sich in der Senkrechten. Dies bedeutet in der Projektion auf der senkrechten *Y*-Achse den Beginn einer Cosinus-Schwingung und in der Projektion auf der waagerechten *X*-Achse den Beginn einer Sinus-Schwingung. Da wir in unseren vorhergehenden Beispielen das Frequenzverhältnis der beiden Seitenbänder 6 : 4 gewählt haben, bedeutet dies, daß der Vektor ω_2 eineinhalbmal so schnell rotiert wie der Vektor ω_1. Legt der Vektor ω_1 z.B. 60° zurück, so dreht sich der Vektor ω_2 um 90° (Fall *b*). Die Addition beider Vektoren ergibt die Größe des Summenvektors, der mit der konstanten Frequenz ω rotiert. Seine jeweilige Projektion auf der *Y*- bzw. *X*-Achse gibt die momentanen Amplitudenwerte des Schwingungszuges des Modulationsproduktes wieder. In Fall *c* ist dies für eine Phasendrehung des Summenvektors von 135° wiedergegeben. Man erkennt ferner, daß z.B. nach einer Drehung des Vektors ω_1 von 360° sich der Vektor ω_2 um weitere 180° gedreht hat und damit beide Vektoren sich gegenseitig aufheben. Der Summenvektor hat dabei spiralförmig seine Amplitude bis auf Null verkleinert. Bei einer weiteren Drehung beider Vektoren wird der Summenvektor entgegengesetzt wiederum spiralförmig bis auf seine ursprüngliche Größe anwachsen. In beiden Projektionen, sowohl auf der *X*- als auch der *Y*-Achse, ist zu erkennen, daß der Summenvektor beim Nulldurchgang der Umhüllenden seine Phase um 180° dreht. Dieser Phasensprung im Modulationsprodukt deutet darauf hin, daß, genauso wie die gedachte Umhüllende, auch die Summenspannung mit der Frequenz ω HF-mäßig nicht vorhanden ist, wenn der Sender ein amplitudenmoduliertes Signal ohne den Träger ausstrahlt. Es sind in diesem Fall HF-mäßig nur die beiden Seitenbandfrequenzen $\omega + \Omega$ und $\omega - \Omega$ nachzuweisen. Das Modulationsprodukt ergibt sich nur aus der Schwebung der beiden Seitenbandfrequenzen, genauso wie die in der Amplitude schwankende Trägerschwingung sich aus dem Träger selbst und den beiden Seitenbändern zusammensetzt. Schickt man nämlich eine amplitudenmodulierte Trägerschwingung durch ein sehr selektives Filter, so kann man alle drei Frequenzen ω, $\omega + \Omega$ und $\omega - \Omega$ mit jeweils konstanter Amplitude nachweisen, bzw. im Modulationsprodukt die beiden Seitenbandfrequenzen $\omega + \Omega$ und $\omega - \Omega$ feststellen.

Die graphische Darstellung eines modulierten Trägers ω mit der Niederfrequenz Ω läßt sich auch durch die bekannten trigonometrischen Winkelfunktionen erklären. Der Schwingungszug in Abb. V. 1. 5. ergab für den

modulierten Träger:

$$A = A_0 \cdot (1 + \cos \Omega t) \cdot \cos \omega t.$$

Multipliziert man dies aus, so erhält man:
$A_0 \cdot \cos \omega t$ als Träger und $A_0 \cdot \cos \Omega t \cdot \cos \omega t$ als Modulationsprodukt. Das Modulationsprodukt ergibt ausmultipliziert:

$$A_0/2 \cdot (\cos (\omega - \Omega)\, t + \cos (\omega + \Omega)\, t).$$

Dies bedeutet, daß das Modulationsprodukt, wie in unserer graphischen Darstellung, aus je einer oberen und unteren Seitenbandfrequenz besteht, die um die Niederfrequenz Ω zum Träger versetzt ist. Die Amplitude beider Seitenbandfrequenzen ist $A_0/2$, unter der Voraussetzung, daß ein 100%-iger Modulationsgrad gewählt wird.

In der gleichen Weise ergibt sich für die Abb. V. 1. 6. ein modulierter Träger $A = A_0 \cdot (1 + \cos \Omega t) \cdot \sin \omega t$, wobei $A_0 \cdot \sin \omega t$ den Träger und $A_0 \cdot \cos \Omega t \cdot \sin \omega t$ das Modulationsprodukt darstellt. Die Seitenbänder des Modulationsproduktes haben die Form $A_0/2 \cdot (\sin \omega - \Omega)\, t + \sin (\omega + \Omega)\, t)$. Im ersten Fall, bei der Abb. V. 1. 5., ergab die Darstellung des Trägers und der beiden Seitenbänder die jeweilige Anfangsphase der Cosinus- Schwingung und im zweiten Fall, bei der Abb. V. 1. 6., den Träger mit seinen beiden Seitenbändern in der Anfangsphasenlage der Sinus-Schwingung bei gleicher Gestalt der zur Modulation benutzten Niederfrequenz $N \cdot \cos \Omega t$. Moduliert man also einen HF-Träger der Schwingungsform $\cos \omega t$, so ergeben sich zwei Seitenbänder, die gleichfalls cosinusförmig schwingen ($\cos (\omega + \Omega)\, t$; $\cos (\omega - \Omega)\, t$). Wird dagegen ein HF-Träger in der Schwingungsform $\sin \omega t$ moduliert, so erhält man zwei Seitenbänder, die auch die sinusförmige Phasenlage besitzen ($\sin (\omega + \Omega)\, t$; $\sin (\omega - \Omega)\, t$).

Das Modulationsprodukt und damit die Seitenbänder enthalten also die gleiche Frequenz- und Phasenlage wie die jeweilige Trägerschwingung.

V. 2. Modulation mit unterdrücktem Träger

Im vorhergehenden Abschnitt wurden die Grundlagen der Amplitudenmodulation erklärt, ohne daß wir uns für den Aufbau des Modulators interessiert haben. Dies wollen wir jetzt soweit nachholen, daß wir das Prinzip der Modulation mit unterdrücktem Träger verstehen können. Wir benutzen als Modulatorschaltung eine Röhrenstufe, wobei die Röhre über zwei getrennte Steuergitter den Anodenstrom durchsteuern kann. Die Prinzipschaltung ist in Abb. V. 2. 1. angegeben.

Am ersten Steuergitter liegt die Informationsspannung Ω und am zweiten Steuergitter die Trägerschwingung ω. Die Informationsspannung

wählen wir als rechteckförmige Impulsspannung, wobei der Modulationsgrad 50% betragen soll. Da beide Steuergitter die Höhe des Anodenstromes bestimmen, werden sich die beiden Signale multiplikativ beeinflussen, so daß im Ausgangssignal neben der Träger- und Informationsspannung auch das Produkt beider zu finden sein wird. Wird z.B. das erste

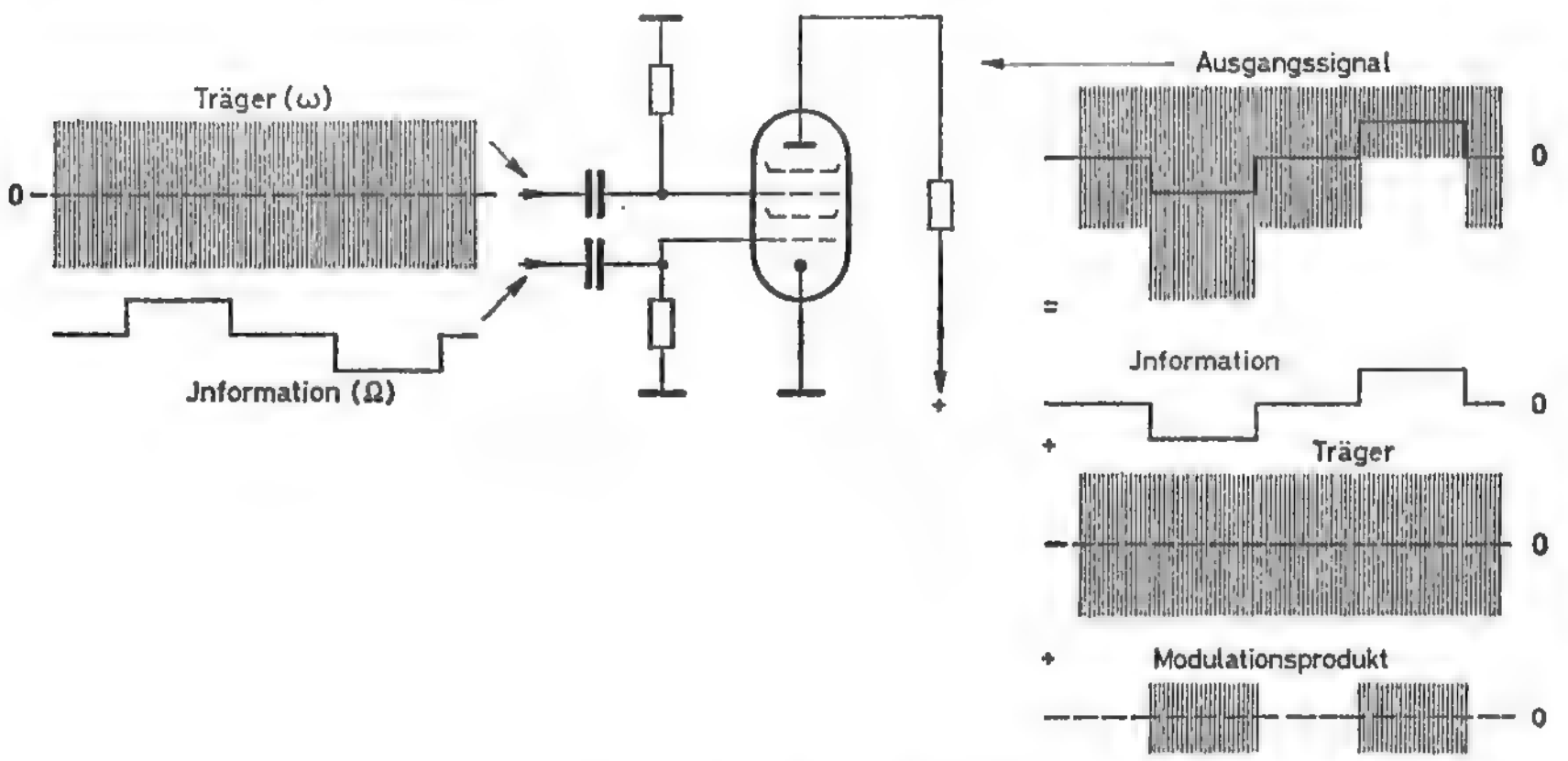


Abb. V. 2. 1. Prinzipschaltung eines Amplituden-Modulators.

Steuergitter durch die Informationsspannung positiver, so steigt die Arbeitssteilheit der Röhre an und die Schwingungsamplitude des Ausgangssignals wird größer.

Im umgekehrten Fall wird bei negativerem ersten Steuergitter die Ausgangsamplitude kleiner. Wir erhalten also die im vorigen Abschnitt kennengelernte Form einer amplitudenmodulierten Trägerschwingung mit ihren verschiedenen Komponenten, die im Ausgangssignal nachzuweisen sein müssen. Darüber hinaus ist, wenn keine zusätzliche Absiebung erfolgt, auch die Informationsspannung selbst im Ausgangssignal vorhanden. Wir finden also im Anodenstrom die Informationsspannung, die Trägerschwingung und das Modulationsprodukt, wobei das Modulationsprodukt aus dem oberen und unteren Seitenband besteht.

Da wir bei der Farbartmodulation den Träger unterdrücken wollen, müssen wir ein Ausgangssignal erzeugen, das nur noch aus dem Modulationsprodukt besteht. Hierfür können wir eine Gegentaktschaltung, die wir zunächst stufenweise aufbauen, benutzen.

In Abb. V. 2. 2. erhält die Röhre I am ersten Steuergitter die Informationsspannung Ω und am zweiten Steuergitter die Trägerschwingung ω. Die Röhre II dagegen, die auf den gleichen Außenwiderstand arbeitet, hat nur am ersten Steuergitter die Informationsspannung, jedoch mit umgekehrter

Polarität wie die Röhre I. In der Röhre I findet wiederum eine multiplikative Beeinflussung beider Steuerspannungen statt, so daß der Anodenstrom von Röhre I, wie im ersten Beispiel, aus den Komponenten Informationsspannung, Trägerschwingung und Modulationsprodukt besteht. Die Röhre

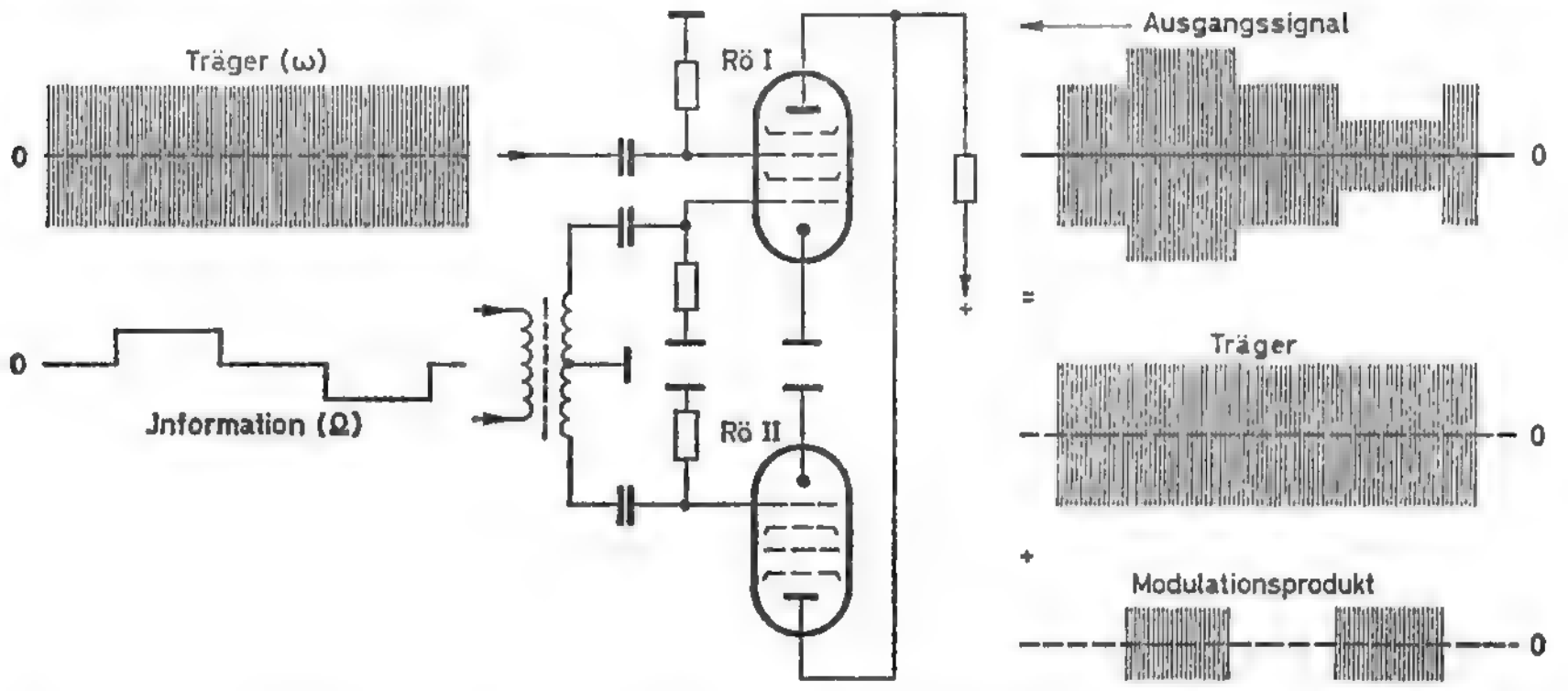


Abb. V. 2. 2. Amplituden-Modulator mit Gegentaktschaltung für die Informationsspannung.

II liefert einen Anodenstrom, der nur die Informationsspannung enthält, aber in Gegenphase zum Anodenstrom von Röhre I. Es heben sich also am Außenwiderstand die beiden von den gegenpoligen Informationsspannungen hervorgerufenen Anodenströme auf. Das Ausgangssignal besteht damit nur noch aus der Trägerschwingung und dem Modulationsprodukt.

Im nächsten Beispiel legen wir, wie in Abb. V. 2. 3., an das zweite Steuergitter von Röhre II noch zusätzlich eine zur Röhre I gegenpolige

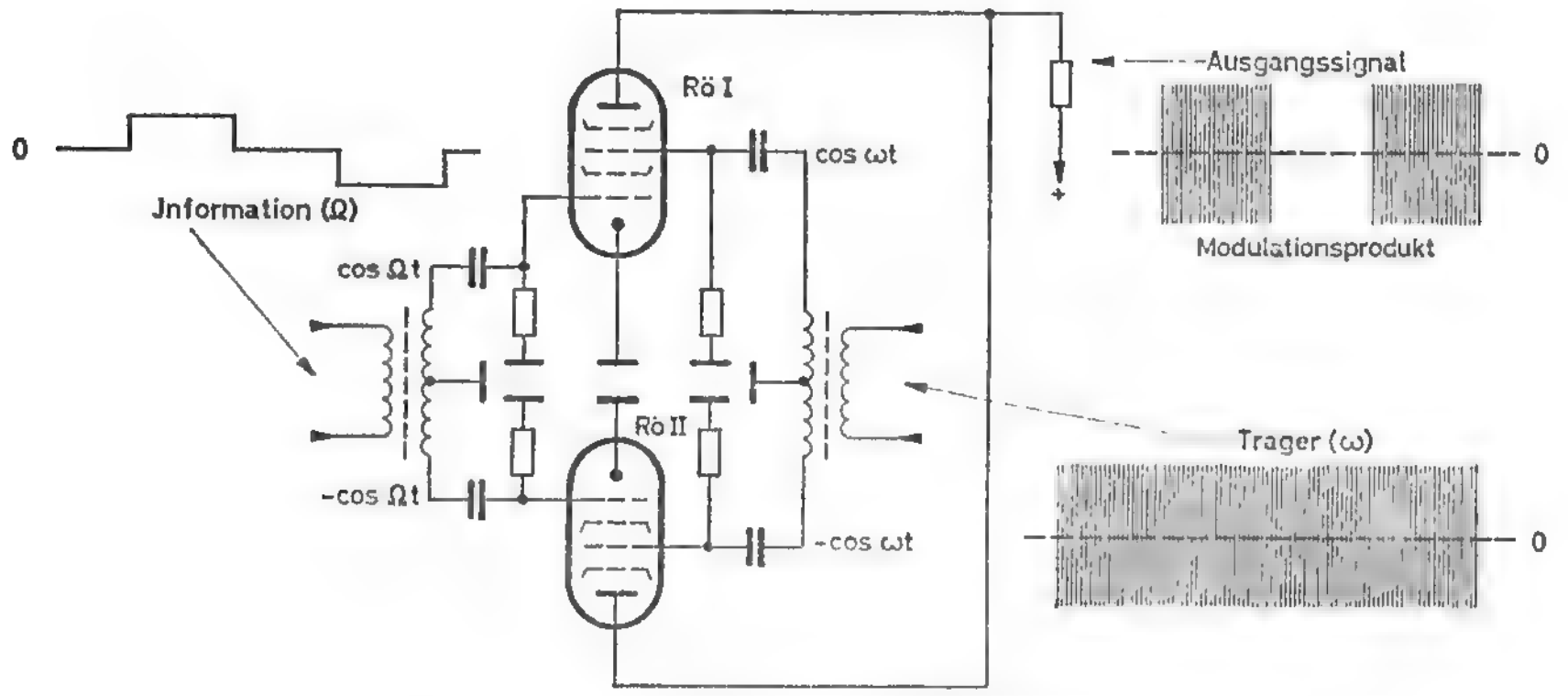


Abb. V. 2. 3. Doppelgegentaktmodulator.

Trägerschwingung und erhalten damit einen Doppel-Gegentaktmodulator. Jetzt findet in beiden Röhren eine multiplikative Beeinflussung zwischen Informationsspannung und Trägerschwingung statt. Jede Röhre liefert also das in Abb. V. 2. 1. gezeigte Ausgangssignal. Da jedoch die beiden von den gegenphasigen Informations- und Trägerspannungen hervorgerufenen Anodenströme sich aufheben, bleibt als Ausgangssignal nur das Modulationsprodukt übrig.

Im vorigen Abschnitt wurde gezeigt, daß bei einer cosinus-förmigen Träger- und Informationsspannung das Modulationsprodukt die Form $A_0 \cdot \cos \Omega t \cdot \cos \omega t$ hat. Bei einer gegenpoligen Spannungsform wird das Modulationsprodukt aus $A_0 \cdot (- \cos \Omega t) \cdot (- \cos \omega t)$ bestehen. Da das Produkt zweier negativer Werte positiv ist, haben die Modulationsprodukte und damit die beiden Seitenbänder beider Röhren gleiche Phasenlage und addieren sich im Ausgangssignal. Stellt man dies für einen Modulationsgrad von 100% vektoriell dar, so ergibt sich einmal bei positiver Träger- und Informationsspannung das bekannte Bild der Abb. V. 2. 4a. und bei negativer Träger- und Informationsspannung ein negativer Trägervektor und positive Seitenbänder. (Abb. V. 2. 4b.)

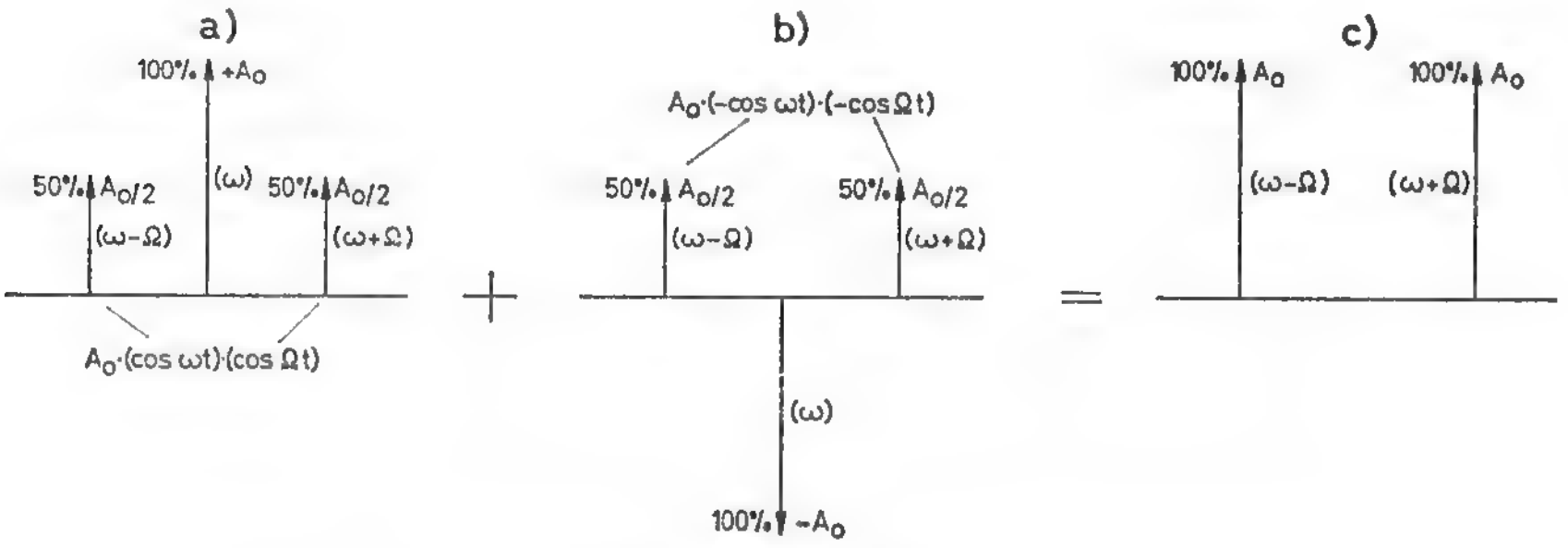


Abb. V. 2. 4. Seitenbänder eines Doppelgegentaktmodulators.

Man erkennt auch hier deutlich, daß sich die beiden Trägerschwingungen auslöschen und die Seitenbänder in gleicher Polarität und Phasenlage addieren (Abb. V. 2. 4c.).

Zur Ergänzung sind in Abb. V. 2. 5. die Schwingungszüge beider Modulationsprodukte aus der Addition von Trägerschwingung und Seitenbändern nochmals dargestellt.

Sowohl in Röhre I als auch in Röhre II entstehen Seitenbänder mit gleicher Polarität und Phasenlage und damit die gleichen Modulationsprodukte trotz gegenphasiger Trägerschwingungen.

Will man jetzt den zeitlichen Amplitudenverlauf der Seitenbänder ohne die Trägerschwingung darstellen, so kommt man zu der Abb. V. 2. 6.

Den fehlenden Träger denken wir uns wiederum als ruhenden Vektor, so daß dann die beiden Seitenbänder mit —Ω bzw. +Ω gegeneinander rotieren und sich zu $\pm 2 \cdot A_0$ addieren. Es ergibt sich also das bekannte Bild eines in der Amplitude schwankenden Schwingungszuges.

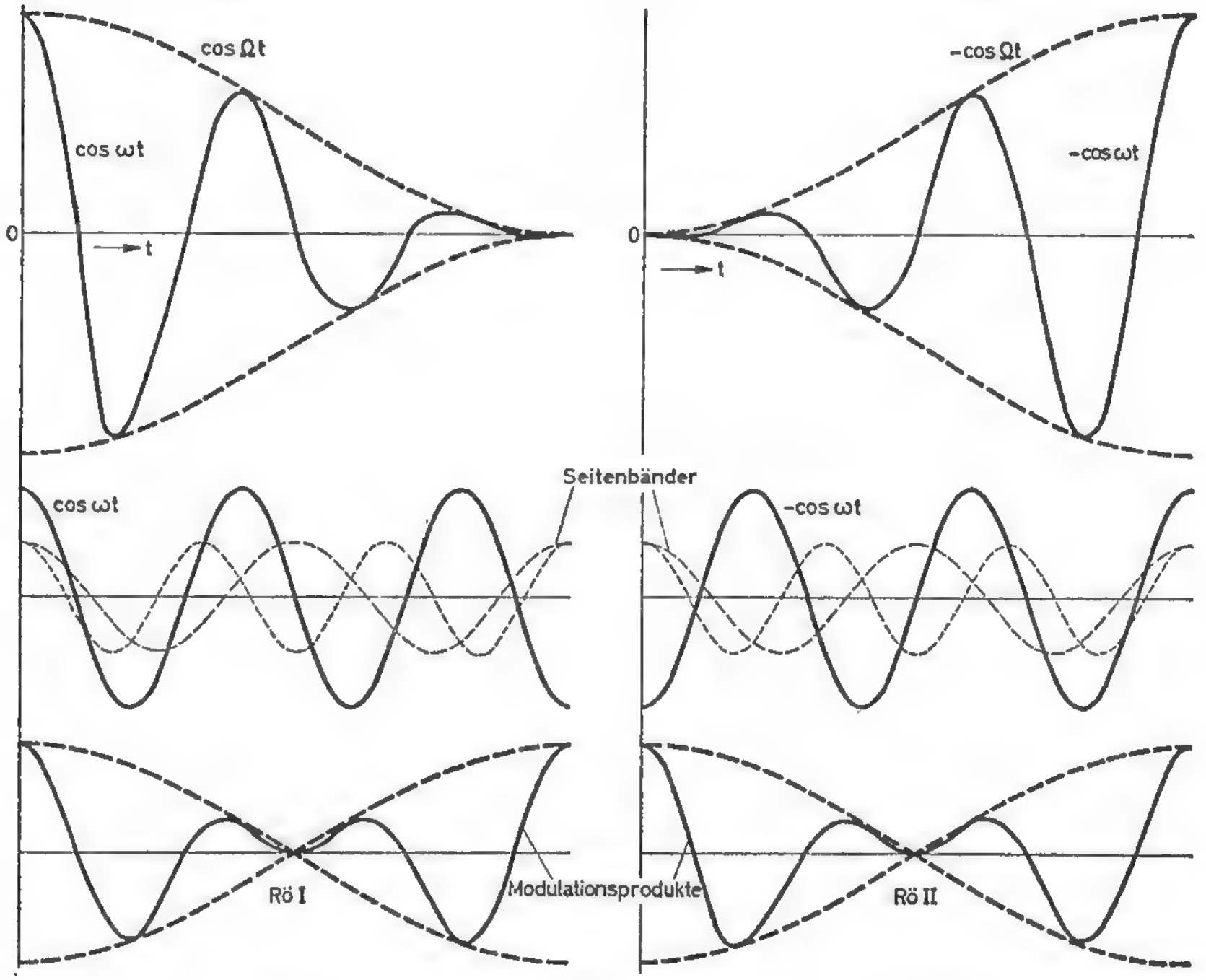


Abb. V. 2. 5. Darstellung der Modulationsprodukte eines Doppelgegentakt-modulators.

In Abb. V. 2. 7. ist schematisch dargestellt, wie man sich die rechteckförmige, amplitudenmodulierte Trägerschwingung aus der Trägerschwingung selbst und dem Modulationsprodukt zusammengesetzt vorstellen kann. Natürlich muß man berücksichtigen, daß zur Übertragung der angedeuteten Rechteckmodulation eine sehr viel höhere Trägerschwingung, als im Beispiel eingezeichnet, benutzt werden muß. Dies ist jedoch vernachlässigt, um die Trägerschwingung selbst deutlicher darstellen zu können. In sehr anschaulicher Weise erkennt man im Modulationsprodukt den Phasensprung von 180° daran, daß einmal der Schwingungszug des Modulationsproduktes sich zur Trägerschwingung addiert und im anderen Fall von der Träger-

schwingung subtrahiert wird. Da in unserem Beispiel das dargestellte Modulationsprodukt eine rechteckförmige Umhüllende hat, besteht es aus sehr vielen Seitenbändern, genauso wie sich jede rechteckförmige Spannung aus der Grundwelle und den verschiedensten Oberwellen zusammensetzt.

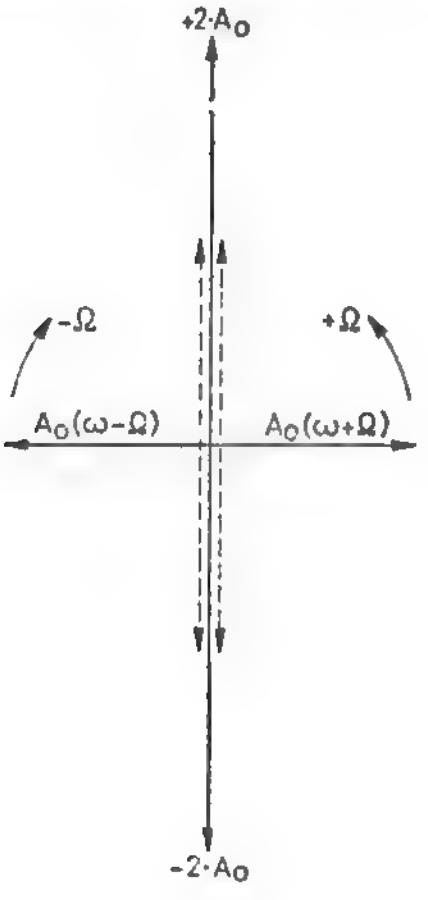


Abb. V. 2. 6. Seitenbänder der Doppelgegentaktmodulation.

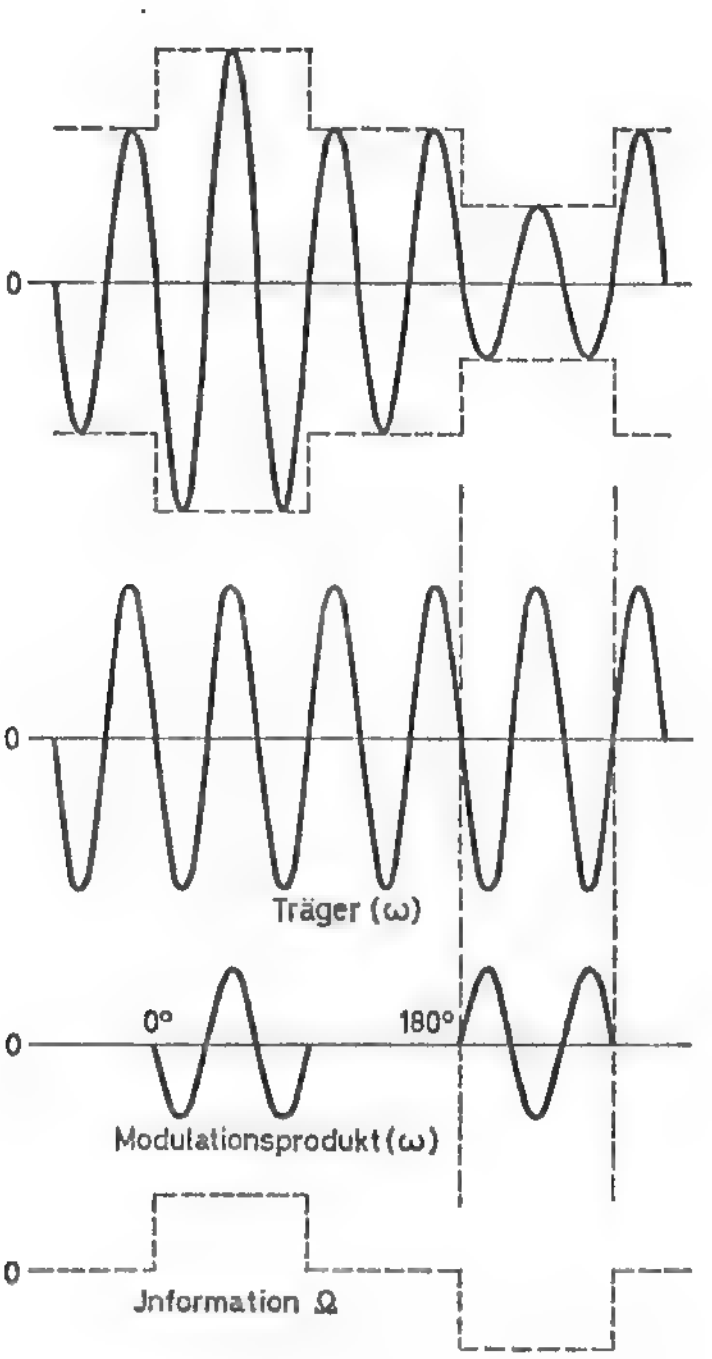


Abb. V. 2. 7. Schematische Darstellung des Modulationsproduktes einer Rechteckmodulation.

Dies ist für uns in diesem Zusammenhang jedoch von untergeordneter Bedeutung, weil zum Verständnis der Zweiphasenmodulation und der nachfolgenden Synchron-Gleichrichtung im Empfänger die Kenntnis des Modulationsproduktes als Summenschwingung der Seitenbänder völlig ausreicht.

V. 3. Zweiphasenmodulation

Da für die Farbartmodulation des Farbträgers zwei voneinander unabhängige Informationsspannungen zur Verfügung stehen, muß in geeigneter Weise versucht werden, den Farbträger gleichzeitig mit zwei Informationen zu modulieren, ohne daß eine gegenseitige Beeinflussung auftritt. Um dies zu erreichen, kann man zwei Doppel-Gegentaktmodulatoren, die um 90° in ihren Trägerschwingungen gegeneinander versetzt sind, benutzen.

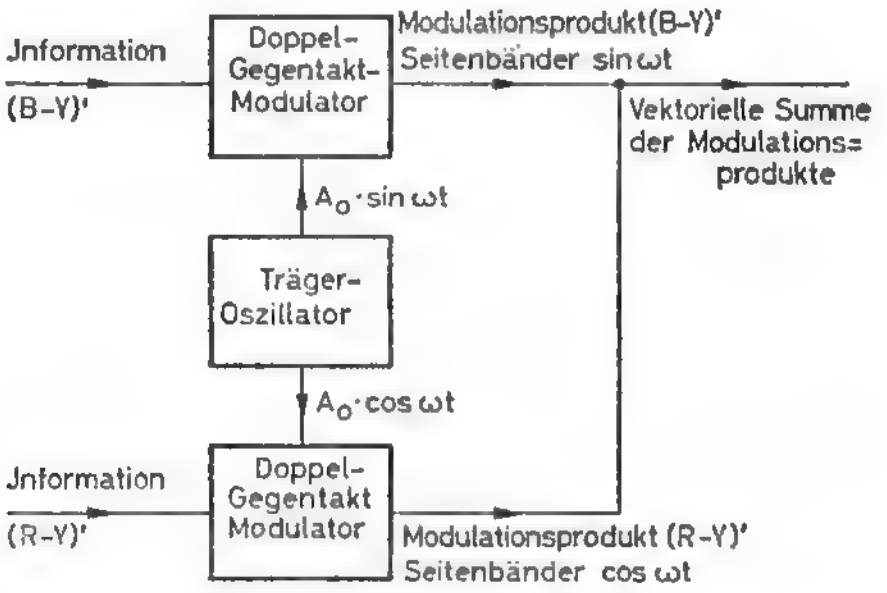


Abb. V. 3. 1. Zweiphasenmodulator.

In Abb. V. 3. 1. erkennen wir, daß die Trägerschwingung in der Phasenlage $A_0 \cdot \sin \omega t$ dem ersten Gegentaktmodulator zugeführt wird und in der Phasenlage $A_0 \cdot \cos \omega t$ dem zweiten Gegentaktmodulator. Der erste Gegentaktmodulator erhält die Farbdifferenzspannung $(B - Y)'$ und der zweite Gegentaktmodulator die Farbdifferenzspannung $(R - Y)'$. Es wird dabei, wie wir bereits im vorigen Abschnitt gesehen haben, jeder Gegentaktmodulator nur das Modulationsprodukt, d.h. die entstehenden Seitenbänder, liefern.

Für den Gegentaktmodulator $(B - Y)'$ sind dies die Seitenbänder mit der Phasenlage $\sin \omega t$ und für den Gegentaktmodulator $(R - Y)'$ die Seitenbänder der Phasenlage $\cos \omega t$. Da beide Gegentaktmodulatoren ausgangsseitig parallel geschaltet sind, besteht das Ausgangssignal aus der vektoriellen Summe beider Modulationsprodukte.

In Abb. V. 3. 2. ist die dazugehörige Vektordarstellung angegeben. Das Modulationsprodukt $(B - Y)'$ besteht aus einem Vektor der Phasenlage $\sin \omega t$, dessen Amplitude entsprechend der Modulationsfrequenz vom Positiven durch Null ins Negative schwankt. Für das Modulationsprodukt

$(R - Y)'$ ergibt sich entsprechend der Phasenlage cos ωt ein Vektor, der um 90° gegen das Modulationsprodukt $(B - Y)'$ phasenverschoben ist. Die vektorielle Summe beider Modulationsprodukte ergibt den Summen-

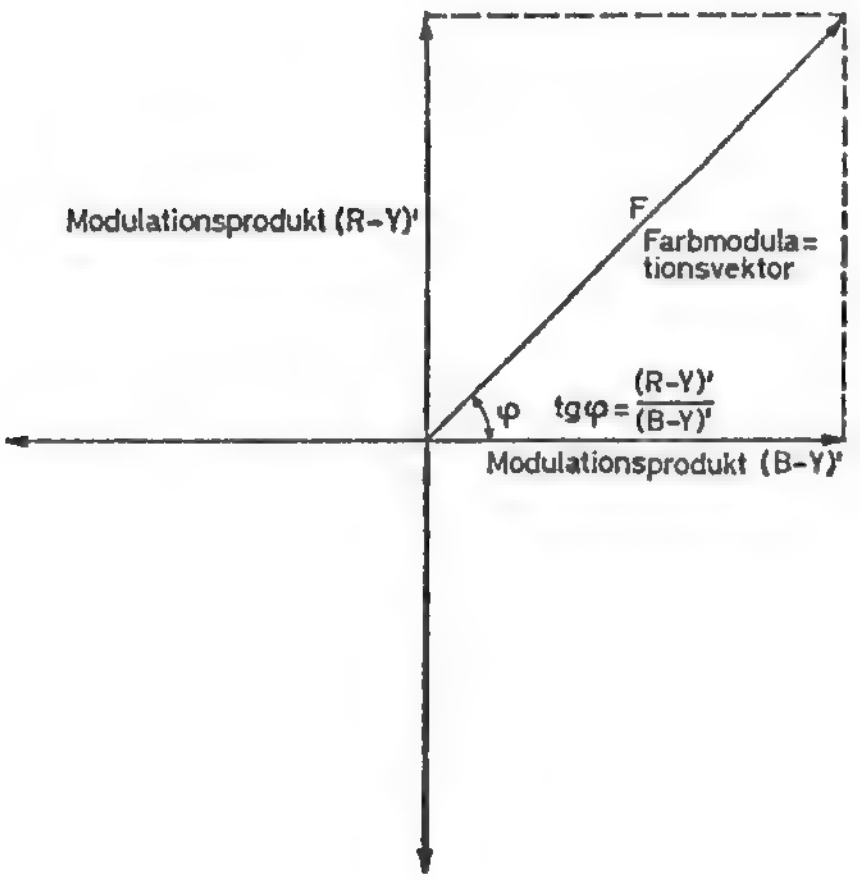


Abb. V. 3. 2. Vektorielle Darstellung der Farbartmodulation.

vektor der Farbart-Modulationsspannung. Die Länge dieses Vektors für die Farbart-Modulationsspannung ist

$$F = \sqrt{(B - Y)'^2 + (R - Y)'^2}.$$

Abhängig von der jeweiligen Amplitudengröße des Modulationsproduktes $(B - Y)'$ und $(R - Y)'$ ergibt sich ein Phasenwinkel φ für die Lage des Farbart-Modulationsvektors. Man erkennt, daß dieser Phasenwinkel zwischen 0° und 360° schwanken kann, je nach Größe und Vorzeichen der beiden Modulationsprodukte.

Nehmen wir als einfachstes Beispiel an, daß sowohl die Farbartspannung $(B - Y)'$ als auch die Farbartspannung $(R - Y)'$ die Form $A_0 \cdot \cos \Omega t$ hat. Im Abschnitt V. 2. hatten wir gesehen, daß bei einer Trägerschwingung der Phasenlage cos ωt und der Informationsspannung cos Ωt das entstandene Modulationsprodukt gleichfalls die Phasenlage cos ωt aufweist und die Umhüllende des Modulationsproduktes mit cos Ωt schwankt.

Dies ist noch einmal in Abb. V. 3. 3a. eingezeichnet. Bei gleichem Verlauf der Informationsspannung und einer Trägerschwingung sin ωt entsteht ein Modulationsprodukt, das gleichfalls die Phasenlage sin ωt besitzt. Es ist dies der Schwingungszug in Abb. V. 3. 3b. Addieren wir die beiden Schwingungszüge der Modulationsprodukte $(B - Y)'$ und $(R - Y)'$, so ergibt sich die Summenschwingung der Abb. V. 3. 3c.

Da in unserem Beispiel beide Informationsspannungen die Amplitude A_0 besitzen, ergibt die vektorielle Addition eine Amplitudengröße von $\sqrt{2} \cdot A_0$ und einen Phasenwinkel φ von 45°. Der Farbartmodulationsvektor F, bestehend aus der vektoriellen Summe der Modulationsprodukte $(B - Y)'$ und $(R - Y)'$, hat also zwei charakteristische Größen. Seine vektorielle Länge $F = \sqrt{(B - Y)'^2 + (R - Y)'^2}$ und seine Phasenlage, bestimmt durch $\operatorname{tg} \varphi = \dfrac{(R - Y)'}{(B - Y)'}$ · Eine Amplitudenveränderung des Farbart-Modulationsvektors bedeutet dabei eine Änderung der Farbsättigung, da sich die Richtung des Vektors nicht verändert und beide Modulationsprodukte sich in gleichem Maße proportional verändern. Wird nur eines der beiden Modulationsprodukte größer oder kleiner, so ändert sich der Phasenwinkel des Farbart-Modulationsvektors, wodurch sich der Farbton verschiebt, da sich das Mischungsverhältnis der beiden Modulationsprodukte zueinander geändert hat.

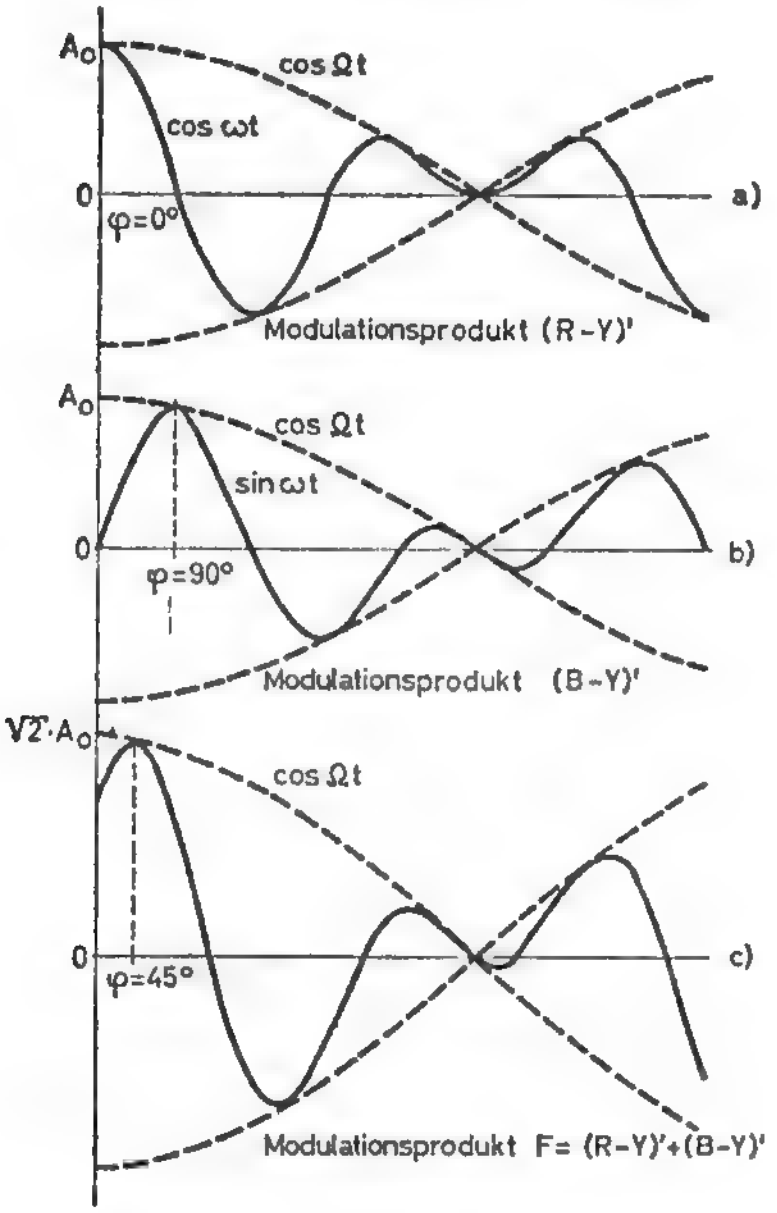


Abb. V. 3. 3. Vektorielle Summe der Modulationsprodukte.

Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, daß sich eine amplitudenmodulierte Trägerschwingung aus drei amplitudenkonstanten Einzelschwingungen zusammensetzt. Diese drei Einzelschwingungen sind einmal die Trägerschwingung selbst und zum anderen das obere bzw. untere Seitenband. Die beiden Seitenbänder haben

dabei jeweils vom Träger den Frequenzabstand der aufmodulierten Information Ω. Addiert man die beiden Seitenbandfrequenzen ohne die Trägerschwingung, so erhält man das sogenannte Modulationsprodukt. In diesem Modulationsprodukt ist HF-mäßig die gesamte Information Ω enthalten, so daß zur HF-Übertragung der Informationen dieses Modulationsprodukt ausreicht.

Baut man einen normalen AM-Modulator in einer Doppel-Gegentaktschaltung auf, so kann man erreichen, daß das Ausgangssignal nur aus dem Modulationsprodukt, also den sich bildenden Seitenbändern besteht.

Werden zwei Doppel-Gegentaktmodulatoren ausgangsseitig zusammengeschaltet und die zugeführten Trägerschwingungen gegeneinander um 90° in der Phase verschoben, so kann man gleichzeitig zwei getrennte Informationsspannungen zur Modulation benutzen. Diese Zweiphasenmodulation bietet also die Möglichkeit, zwei voneinander unabhängige Informationsspannungen ohne gegenseitige Beeinflussung zu einer Summenspannung im Modulationsprodukt zusammenzufassen, wobei der Phasenwinkel φ des Ausgangssignals ein Maß für den Farbton ist und die Vektorlänge F die Sättigung wiedergibt.

KAPITEL VI

KOMPLETTES SENDERSIGNAL

Übersicht

Das Schwarz/Weiß-Impulsschema kann in seiner wesentlichsten Form für die Farbfernsehnorm übernommen werden. Zusätzlich muß vom Sender ein Farbträger-Synchron-Signal ausgestrahlt werden, damit im Empfänger die Rückgewinnung der Farbartspannung möglich ist. Das Farbträger-Synchron-Signal besteht dabei aus einem Farbträger-Schwingungszug, der auf der hinteren Schwarzschulter des Horizontal-Synchronimpulses sitzt. Dieser Farbträger-Schwingungszug wird als „Burst" bezeichnet und enthält 8 bis 11 Schwingungszüge des unmodulierten Farbträgers. Die Phasenlage des Farbträger-Schwingungszuges ist dabei so gewählt, daß sie in Gegenphase zur $(U_B - U_Y)'$-Modulationsachse liegt. Die komplette Modulationsspannung des Bildträgers eines Farbfernsehsenders besteht damit aus dem Leuchtdichtesignal U_Y, dem Farbartsignal $U_F \cdot \sin(\omega t + \varphi)$ und dem Synchronsignalgemisch mit dem „Burst". Zusammengefaßt wird noch einmal schrittweise gezeigt, wie sich die Bildträgerspannung von der Kamera über die Farbdifferenz- und Modulationsspannungen bis zum kompletten Bildträger-Signal stufenweise aufbaut. Als Anhang sind dann in Tabellenform für die Primär- und Komplementärfarben die wichtigsten Grundgleichungen mit ihren Amplituden und Phasenwerten zusammengestellt.

VI. 1. Ergänzungen zum Schwarz/Weiß-Signal

Die Ergänzung bzw. Erweiterung des Schwarz/Weiß-Normsignals zur Farbübertragung besteht aus zwei wesentlichen Komponenten:

1. das Synchron-Impulsschema enthält einen Farbträger-Schwingungszug,
2. neben der Leuchtdichtemodulation wird das Modulationsprodukt der Farbartspannung übertragen.

Da aufgrund der Kompatibilitätsbedingungen sowohl die Horizontal- als auch die Vertikalablenkfrequenzen unverändert bleiben, kann das bisherige Synchronisations-Impulsschema in seiner wesentlichsten Form für die Farbfernsehsender erhalten bleiben. Es muß lediglich für die phasenrichtige Rückgewinnung der Farbartspannung im Empfänger ein zusätzliches

Synchronsignal des Farbträgers mit übertragen werden. Dies ist deshalb notwendig, weil bei der Zweiphasenmodulation der Farbträger selbst unterdrückt und anschließend HF-mäßig nicht mitausgestrahlt wird. Das Farbträger-Synchronsignal muß also aus dem Farbträger-Schwingungszug des Senders bestehen und die Phasenlage der unmodulierten Trägerschwingung aufweisen. Man ordnet zu diesem Zweck einen Farbträger-Schwingungszug, der auch als „Burst" bezeichnet wird, auf der hinteren Schwarzschulter des Horizontal-Synchronimpulses an. Während der Zeitdauer der Vertikal-Synchronimpulse sowie der Ausgleichsimpulse ist der „Burst" nicht vorhanden. Er besteht dabei aus 8 bis 11 Schwingungszügen der Farbträgerfrequenz von 4,43 MHz. In Abb. VI. 1. 1. ist die Form des bisherigen Horizontal-Synchronimpulses beim Schwarz/Weiß-Signal eingetragen und gleichzeitig die erforderlichen Ergänzungen zur Einfügung des Farbsynchron-Signals angegeben.

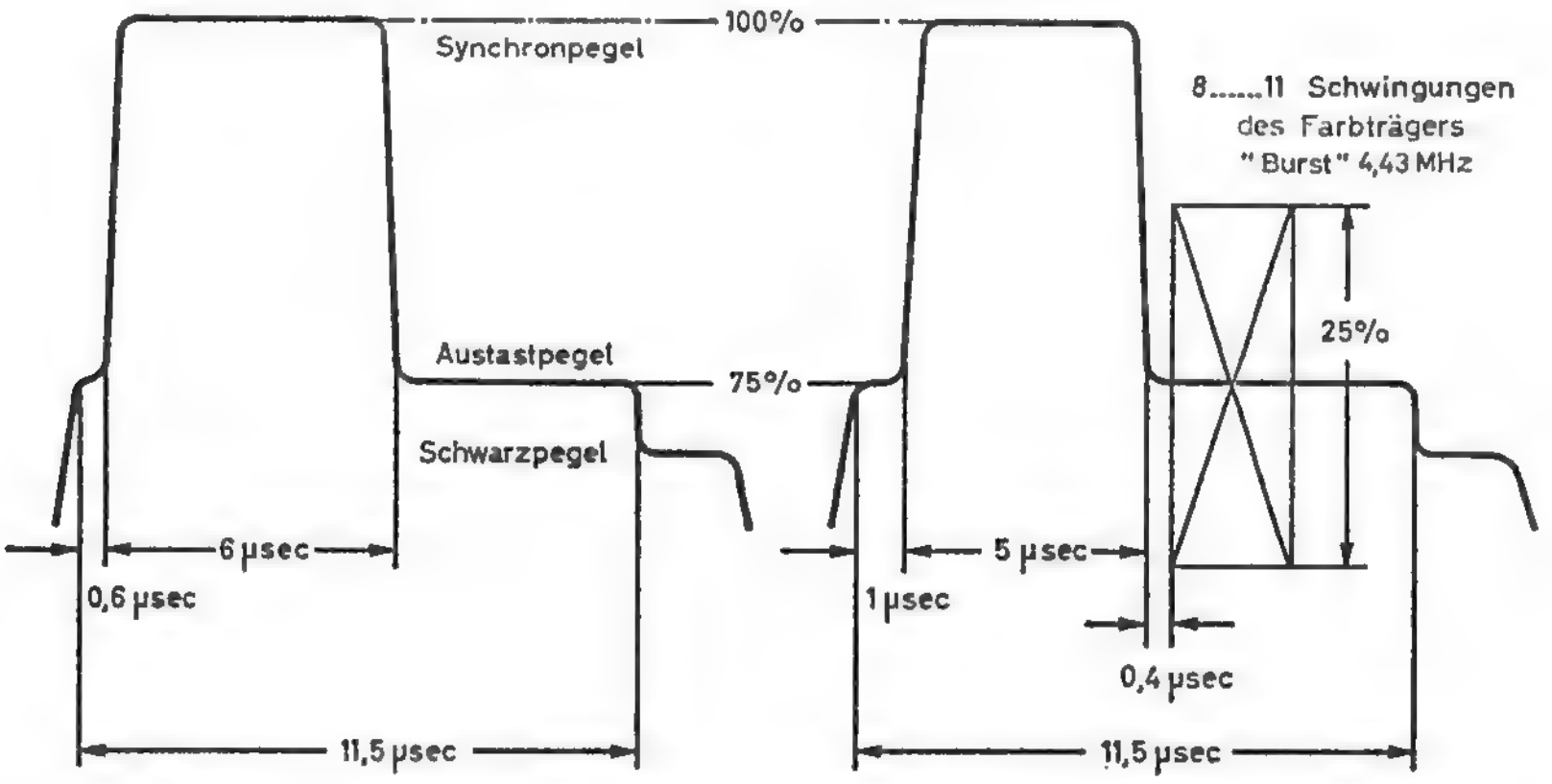


Abb. VI. 1. 1. Vergleich des Horizontal-Impulsschemas zwischen dem Schwarz/Weiß- und Farbsynchronsignal.

Für das Farbfernseh-Normsignal ist die Breite des Synchronimpulses etwas verringert, damit auf der hinteren Schwarzschulter der Farbträger-Schwingungszug besser untergebracht werden kann. Die Amplitude des Farbträger-Schwingungszuges ist, von Spitze zu Spitze gemessen, genau so groß, wie die Amplitude des Synchronimpulses, nämlich 25%. Die 8 bis 11 Farbträger-Schwingungszüge entsprechen dabei einer Breite von 1,8 bis 2,5 µsec. Das gesamte übrige Impulsschema, einschließlich der Vertikal-Austastlücke mit den Vertikal-Synchronimpulsen sowie den Vor- und Nachausgleichsimpulsen, bleibt unverändert erhalten.

Die Bezugsphase für die Modulationsachsen des Farbartsignals sind so

festgelegt, daß die $(B - Y)'$-Modulationsachse der Phasenlage 0° entspricht. In der üblichen Darstellungsweise wird dann um 90° voreilend die $(R - Y)'$-Modulationsachse in linksdrehender Vektordarstellung angeordnet. Die Q- und I-Achse ist jeweils um 33° gegenüber den beiden Farbdifferenzachsen $(B - Y)'$ und $(R - Y)'$ versetzt. Für die Farbträgerschwingung, als Synchronsignal auf der hinteren Schwarzschulter des Horizontal-Synchronimpulses, ist die Bezugsphase mit 180° festgelegt. Diese Phasenbeziehung der Farbträgerschwingung zu den Modulationsachsen ist in Abb. VI. 1. 2. dargestellt. Man hat für die Farbträgerschwingung auf der hinteren Schwarzschulter die Phasenlage von 180° gewählt, da der Schwingungszug dann im Empfänger die geringste Helligkeitssteuerung an der Bildröhre vornehmen kann.

Normalerweise ist diese Helligkeitssteuerung nicht sichtbar, da die Bildröhre während der hinteren Schwarzschulter des Horizontal-Synchronimpulses dunkel gesteuert ist. Lediglich bei nicht ausreichender Dunkelsteuerung oder bei falscher Farbsynchronisation kann eine Helligkeitssteuerung eintreten.

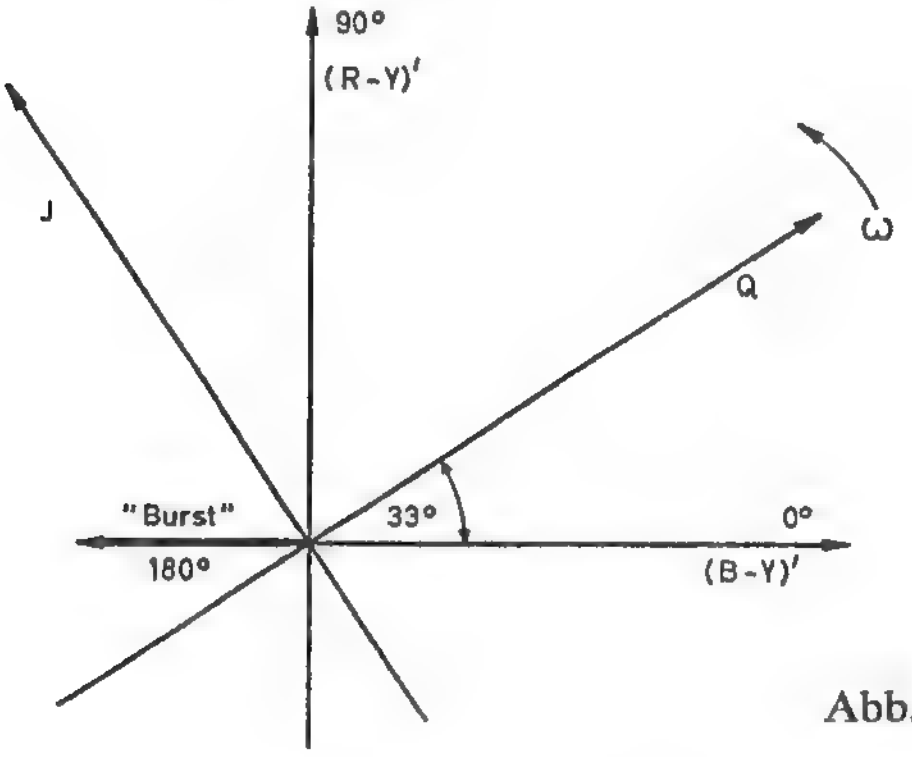


Abb. VI. 1. 2. Phasenlage des „Burst" zu den Modulationsachsen.

Wie wir später bei der Behandlung des Synchrongleichrichters sehen werden, liefert dieser Farbträger-Schwingungszug im $(R - Y)$-Signal nach der Gleichrichtung keine Signalamplitude. Im $(B - Y)$-Signal entsteht eine negative Spannung, die an der Farbbildröhre gleichfalls keine Steuerwirkung ausüben kann, weil in dieser Zeit das Leuchtdichtesignal Null und damit die Bildröhre gesperrt ist.

Lediglich für die Signalkomponente $(G - Y)$ ergibt sich ein kleiner positiver Wert, der bei nicht ausreichender Dunkelspannung eine schwache grüne Farbspannung während der Zeit der Horizontal-Schwarzschulter erzeugen kann. Für die anderen möglichen Phasenlagen des Farbträger-

Schwingungszuges bei 0°, 90° bezw. 270° ergeben sich jeweils ungünstigere Werte an der Farb-Bildröhre.

Neben dem Leuchtdichtesignal, das in der üblichen Weise wie beim Schwarz/Weiß-Sender zur Modulation des Bildträgers herangezogen wird, ist beim Farbfernsehsender gleichzeitig das Modulationsprodukt der beiden Farbartspannungen mit vorhanden. Da im Zweiphasenmodulator des Senders der Farbträger selbst unterdrückt wird, ergibt sich aus den beiden Farbdifferenzspannungen die Amplitude und Phasenlage der Farbartspannung U_F. Die Farbartspannung U_F besteht dann aus der Grundschwingung des Farbträgers von 4,43 MHz und moduliert zusammen mit dem Leuchtdichtesignal anschließend den Bildträger. Das gesamte Bildträgersignal setzt sich also aus drei Grundkomponenten zusammen, nämlich aus dem Leuchtdichtesignal U_Y, dem Farbartsignal U_F und dem Synchronsignalgemisch mit dem Farbträger-Schwingungszug. Wir können also jetzt die komplette Bildträgerspannung für alle auftretenden Farbkomponenten bestimmen. Dies ist in Abb. VI. 1. 3. (S. 97) z.B. für die drei Primärfarben mit den dazugehörigen Komplementärfarben angegeben. Die eingetragenen Amplituden und Phasenangaben sind aus der am Schluß dieses Kapitels befindlichen Zusammenstellung und der dazugehörigen Tabelle zu entnehmen.

Für die Komplementärfarbe Gelb sei noch einmal kurz der hierfür benötigte Rechnungsgang aufgezeigt. Die Leuchtdichtespannung U_Y besteht bei der Farbe Gelb, die sich aus den Primärfarben Rot und Grün ermischen läßt, aus den Anteilen:

$$U_Y = 0{,}30\ U_R + 0{,}59\ U_G = 0{,}89.$$

Die Farbdifferenzspannungen ergeben für die Farbe Gelb:

$$(U_R - U_Y)' = 0{,}62\ U_R - 0{,}52\ U_G = 0{,}10 \text{ und}$$

$$(U_B - U_Y)' = -0{,}15\ U_R - 0{,}29\ U_G = -0{,}44.$$

Die Umformung in die Modulationsspannungen U_I und U_Q nehmen wir nicht vor, da, wie bereits früher erwähnt, dies lediglich einen Einfluß auf die maximal zu übertragende Farbbandbreite hat und im Empfänger in jedem Fall zur Ansteuerung der Farb-Bildröhre die Farbdifferenzspannungen $(U_R - U_Y)$ und $(U_B - U_Y)$ zurückgewonnen werden müssen.

Als Farbartspannung U_F ergibt sich durch die rechtwinklige Addition in der Zweiphasenmodulation des Farbträgers eine Modulationsamplitude:

$$U_F = \sqrt{(U_R - U_Y)'^2 + (U_B - U_Y)'^2}.$$

Wir erhalten also für unsere Farbe Gelb:

$$U_F = \sqrt{(0{,}10)^2 + (-0{,}44)^2} = \pm 0{,}44.$$

Im Vektordiagramm eingetragen ergeben die beiden Amplitudenwerte 0,10 für $(U_R - U_Y)'$ und — 0,44 für $(U_B - U_Y)'$ einen Phasenwinkel von 167°. Die Komplementärfarbe Gelb hat also die gleiche Amplitudengröße bei entgegengesetzter Phasenlage wie die Primärfarbe Blau, so daß beide gemischt sich aufheben, wie es für den Farbeindruck Weiß sein muß. In der gleichen Weise können neben den drei Primärfarben die beiden übrigen Komplementärfarben Cyan und Purpur amplituden- und phasenmäßig bestimmt werden. Aus Abb. VI. 1. 3. ist ferner zu erkennen, daß neben der 33%igen Übermodulation der Primärfarben Rot und Blau im Synchronbereich, die beiden Komplementärfarben Gelb und Cyan mit je 33% über den Weißpegel hinausreichen. Bei diesen beiden Komplementärfarben wird also bei voller Sättigung ein Teil der Amplituden durch den Träger-Nullwert abgeschnitten.

Rechnet man die Amplitude des Farbträger-Schwingungszuges von ± 12,5% bezogen auf den Trägerspitzenwert, auf die Modulationsamplitude zwischen Schwarz- und Weißpegel um, so erhält man eine Amplitude von ± 0,21. Das Farbartsignal U_F hat also während der Zeitdauer der hinteren Schwarzschulter des Horizontal-Synchronimpulses beim sogenannten „Burst" eine Amplitude von ± 0,21 und die Bezugsphase von 180°. Während der Hinlaufperiode besteht das Farbartsignal aus den jeweiligen Amplitudenwerten der vorhandenen Farbmodulationen.

Trennt man das komplette Sendersignal in seine Grundkomponenten auf, so kann man aus Abb. VI. 1. 4. erkennen, daß eine volle Übereinstimmung mit dem Schwarz/Weiß-Signal in folgenden Punkten besteht:

a) Mit der Grundfrequenz von 50 Hz (20 msec) erscheinen die Vertikal-Austastlücken mit den Vertikal-Synchronimpulsen sowie den Vor- und Nachausgleichsimpulsen.
b) Im Abstand mit 15 625 Hz (64 µsec) sitzen auf der Horizontal-Austastlücke die Horizontal-Synchronimpulse mit der vorderen und hinteren Schwarzschulter.
c) Der Bildträger wird zwischen dem Schwarzpegel (70%) und dem Weißpegel (10%) mit dem Leuchtdichtesignal in negativer Modulationsrichtung amplitudenmoduliert.

Die Ergänzung und Erweiterung besteht darin, daß einmal der „Burst" auf der hinteren Schwarzschulter der Horizontal-Synchronimpulse angeordnet ist (d) und das eigentliche Farbsynchronsignal darstellt. Zum anderen wird dem Leuchtdichtesignal das Modulationsprodukt der Farbartspannung überlagert (e), das die Farbsteuerung im Empfänger über die Sättigung und den Farbton vornimmt.

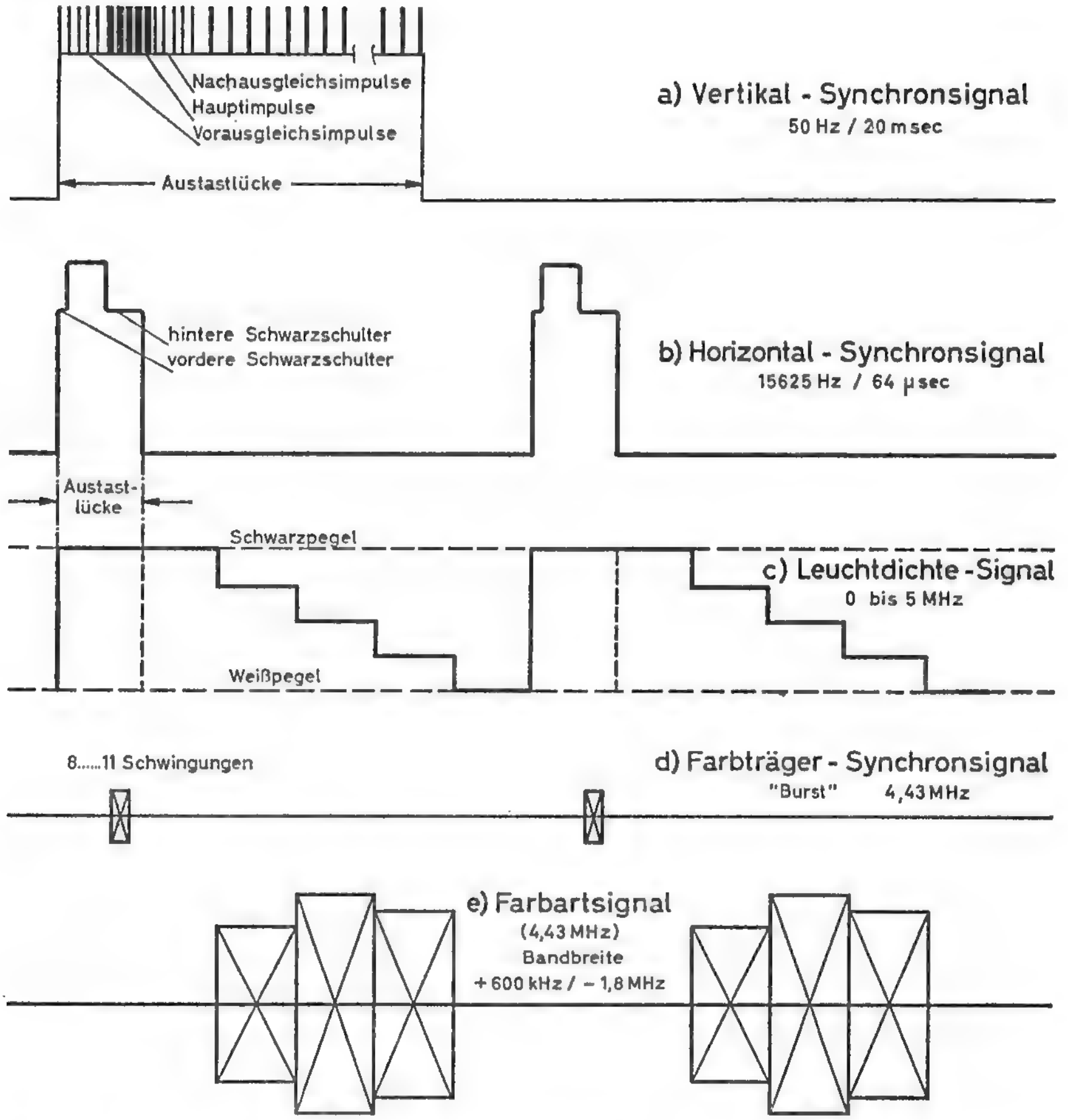


Abb. VI. 1. 4. Aufbau des kompletten Sendersignals aus Synchronimpulsen, Leuchtdichte- und Farbartsignal.

VI. 2. Signalwerte von der Kamera bis zur Bildträgerspannung

Wir haben bis jetzt alle wichtigen Grundprobleme beim Sender für die Farbübertragung kennengelernt, so daß wir das komplette Bildträgersignal, welches der Sender ausstrahlt, bilden können. Es sollen deshalb nachfolgend stufenweise noch einmal die verschiedenen Spannungen angegeben werden, die, angefangen von der Aufnahmekamera bis zur Bildträger-Modulationsspannung, beim Sender auftreten. Wenn man jederzeit die einzelnen Umwandlungsphasen der Farbspannungen in ihren Grundzügen kennt, werden später die Empfängerschaltungen verständlicher, da in genau umgekehrter Weise alle einzelnen Phasen wieder durchlaufen werden

müssen, damit die ursprünglich vor der Aufnahmekamera des Senders vorhandenen Grundfarben wiedergewonnen werden.

Als Bildvorlage vor der Aufnahmekamera beim Sender wählen wir wieder die Farben Weiß, Rot, Grün, Blau und Schwarz, die als vertikales Balkenmuster erscheinen sollen, d.h. in horizontaler Abtastrichtung eine entsprechend geartete Farbspannung erzeugen. Dies ist in Abb. VI. 2. 1. (S. 98) angegeben.

Aus den drei Kamerasignalen U_R, U_B und U_G bilden wir das Leuchtdichtesignal U_Y, das dabei aus den Amplitudenwerten 1,00; 0,30; 0,59; 0,11 und 0 besteht. Diese Amplitudenwerte modulieren den Bildträger des Farbfernsehsenders zwischen den Aussteuergrenzen des Schwarzpegels von 70% und des Weißpegels von 10%.

Für die beiden Farbmodulationsspannungen des Farbträgers wählen wir wiederum nur die Farbdifferenzspannungen $(U_R - U_Y)'$ und $(U_B - U_Y)'$. Es ergeben sich für $(U_R - U_Y)'$, in der gleichen Reihenfolge wie vorher, die Farbdifferenzspannungen: 0; 0,62; — 0,52; — 0,10; 0. Für $(U_B - U_Y)'$ ergibt sich: 0; — 0,15; — 0,29; 0,44; 0. Die Farbdifferenzspannung $(U_R - U_Y)'$ wird im Zweiphasenmodulator mit der Farbträgerspannung $U_F \cdot \cos \omega t$ moduliert und die Farbdifferenzspannung $(U_B - U_Y)'$ mit der Trägerschwingung $U_F \cdot \sin \omega t$. Das Modulationsprodukt, d.h. die Seitenbänder ohne die Trägerschwingung, hat dabei für $(U_R - U_Y)'$ die Amplitudenwerte: 0; $\mp$ 0,62; $\mp$ 0,52; $\pm$ 0,10 und 0. Die entgegengesetzte Reihenfolge der Vorzeichen deutet dabei an, daß einmal die Trägerschwingung mit $+ \cos \omega t$ und zum *anderen* mit $-\cos \omega t$ beginnt. In ähnlicher Weise ergibt sich für $(U_B - U_Y)'$: 0; $\mp$ 0,15; $\mp$ 0,29; $\pm$ 0,44 und 0.

Sehr deutlich erkennt man auch hier, daß beim Nulldurchgang der Modulationsspannung im Modulationsprodukt ein Phasensprung von 180° stattfindet. Die Addition der beiden Modulationsprodukte $(U_R - U_Y)' \cdot \cos \omega t$ und $(U_B - U_Y)' \cdot \sin \omega t$ ergibt das Farbartsignal $U_F \cdot \sin (\omega t + \varphi)$. Daraus erhalten wir in der Reihenfolge der Farben Rot, Grün und Blau als Amplitudenwerte: $\pm$ 0,63; $\pm$ 0,59; $\pm$ 0,44 mit den Phasenwinkeln: 103°; 241° und 347°.

Sowohl das Leuchtdichtesignal U_Y als auch das Farbartsignal U_F zusammen mit dem Synchronsignalgemisch einschließlich des „Burst" werden dann amplitudenmäßig addiert und stellen damit das gesamte Bildmodulationssignal dar. Es hat damit die Form:

$$U_M = U_Y + U_F \cdot \sin (\omega t + \varphi) + \text{Synchronsignal},$$

womit der HF-Bildträger amplitudenmoduliert wird.

Zusammenfassung

Das Synchron-Impulsgemisch des Schwarz/Weiß-Senders kann mit geringfügigen Veränderungen für die Farbfernsehnorm übernommen werden. Es wird lediglich auf der hinteren Schwarzschulter des Horizontal-Synchronimpulses ein Farbträger-Schwingungszug, der sogenannte „Burst", untergebracht. Dieser „Burst" besteht aus 8 bis 11 Schwingungszügen des unmodulierten Farbträgers und wird zur phasenrichtigen Rückgewinnung der Farbartspannung im Empfänger benötigt. Die Farbträgerschwingung hat dabei die Bezugsphase von 180° und eine Amplitudengröße von Spitze zu Spitze, die dem Synchronimpuls von 25% entspricht. Es wird noch einmal die gesamte Bildträgerspannung aus der Addition des Leuchtdichtesignals U_Y und des Farbartsignals U_F zusammen mit dem Synchronsignal für die drei Primär- und die dazugehörigen Komplementärfarben dargestellt. In einzelnen Stufen wird noch einmal die Umwandlung und Umformung der drei Kameraspannungen U_R, U_G und U_B über die Farbdifferenzspannungen, dem Modulationsprodukt des Farbträgers bis zur kompletten Bildträgerspannung gezeigt.

Als Anhang ist in Tabellenform eine Zusammenfassung sowohl der Kamera- als auch Modulationssignale mit den wichtigsten Matrixgrößen aufgeführt. Für die Primär- und Komplementärfarben sind daneben auch die Farbartamplitudenwerte und die jeweilige Phasenlage angegeben.

Anhang

KAMERASIGNALE

$$U_Y = +0{,}30\,U_R + 0{,}59\,U_G + 0{,}11\,U_B$$
$$U_R - U_Y = +0{,}70\,U_R - 0{,}59\,U_G - 0{,}11\,U_B$$
$$U_B - U_Y = -0{,}30\,U_R - 0{,}59\,U_G + 0{,}89\,U_B$$
$$(U_G - U_Y = -0{,}30\,U_R + 0{,}41\,U_G - 0{,}11\,U_B)$$

MODULATIONSSIGNALE

$$(U_R - U_Y)' = 0{,}88\,(U_R - U_Y) = +0{,}62\,U_R - 0{,}52\,U_G - 0{,}10\,U_B$$
$$(U_B - U_Y)' = 0{,}49\,(U_B - U_Y) = -0{,}15\,U_R - 0{,}29\,U_G + 0{,}44\,U_B$$
$$(U_G - U_Y)' = 1{,}43\,(U_G - U_Y) = -0{,}43\,U_R + 0{,}59\,U_G - 0{,}16\,U_B$$
$$(U_G - U_Y) = -0{,}58\,(U_R - U_Y)' - 0{,}38\,(U_B - U_Y)'$$

$$U_I = 0{,}74\,(U_R - U_Y) - 0{,}27\,(U_B - U_Y)$$
$$U_Q = 0{,}48\,(U_R - U_Y) + 0{,}41\,(U_B - U_Y)$$
$$U_I = 0{,}60\,U_R - 0{,}28\,U_G - 0{,}32\,U_B$$
$$U_Q = 0{,}21\,U_R - 0{,}52\,U_G + 0{,}31\,U_B$$

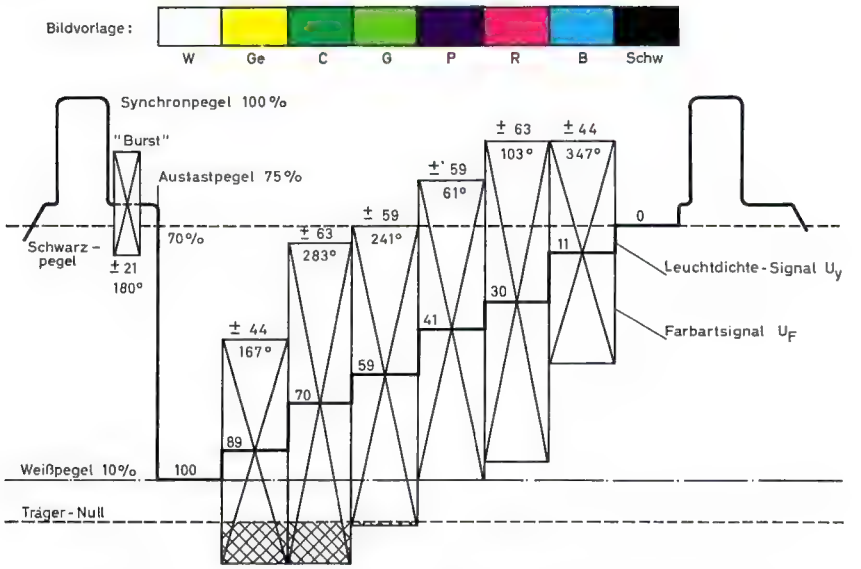


Abb. VI. 1. 3. Bildträgerspannung für Primär- und Komplementärfarben.

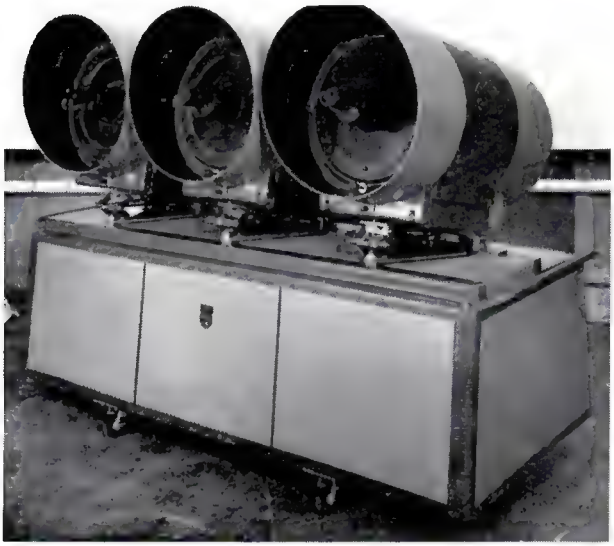


Abb. VIII. 1. 2. Philips Farb-Großbild-Projektor EL 5795.

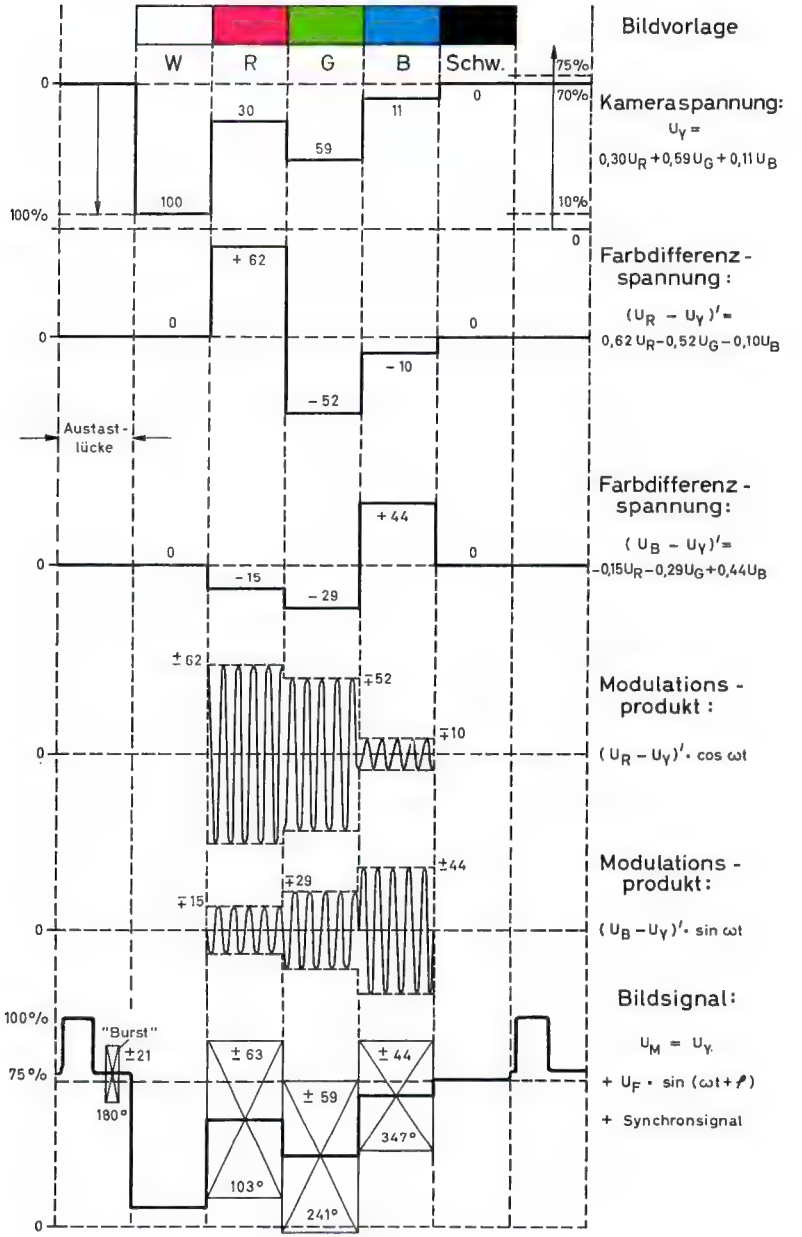


Abb. VI. 2. 1. Umwandlung einer Bildvorlage über Leuchtdichte- und Farbdifferenzsignale bis zur Bildträgerspannung.

MATRIXGRÖSSEN

$$U_R - U_Y = +0{,}96\,U_I + 0{,}62\,U_Q$$
$$U_B - U_Y = -1{,}11\,U_I + 1{,}70\,U_Q$$
$$U_G - U_Y = -0{,}27\,U_I - 0{,}65\,U_Q$$
$$U_R = (U_R - U_Y) + U_Y$$
$$U_B = (U_B - U_Y) + U_Y$$
$$U_G = (U_G - U_Y) + U_Y$$

$$U_G = -0{,}51\,(U_R - U_Y) - 0{,}19\,(U_B - U_Y) + U_Y$$
$$= -0{,}51\,U_R - 0{,}19\,U_B + 1{,}7\,U_Y$$

BILDTRÄGERSPANNUNG

Farbe	U_Y	$(U_R - U_Y)'$	$(U_B - U_Y)'$	U_I	U_Q	U_F	φ
Weiß	100	0	0	0	0	0	—
Gelb	89	+ 10	— 44	+ 32	— 31	± 44	167°
Cyan	70	— 62	+ 15	— 60	— 21	± 63	283°
Grün	59	— 52	— 29	— 28	— 52	± 59	241°
Purpur	41	+ 52	+ 29	+ 28	+ 52	± 59	61°
Rot	30	+ 62	— 15	+ 60	+ 21	± 63	103°
Blau	11	— 10	+ 44	— 32	+ 31	± 44	347°
Schw.	0	0	0	0	0	0	—
Burst	—	—	—	—	—	± 21	180°

KAPITEL VII

BLOCKSCHALTBILD EINES FARBFERNSEHEMPFÄNGERS

Übersicht

Im Vergleich mit dem Blockschaltbild eines Schwarz/Weiß-Fernsehempfängers wird der Stufenaufbau eines Farbfernsehempfängers dargestellt. Alle im Schwarz/Weiß-Empfänger vorhanden gewesenen Grundstufen bleiben auch im Farbfernsehempfänger erhalten. Lediglich zur Ergänzung der speziellen Farbsteuerung der Farbbildröhre, die als Dreifarben-Maskenröhre ausgebildet ist, sind zusätzliche Farbstufen vorhanden. Diese Farbstufen umfassen einmal die Schaltungsgruppen für das Farbartsignal vom ZF-Verstärker bis zur Farbbildröhre, bestehend aus dem Farbartgleichrichter, dem Farbartverstärker, dem Synchron-Gleichrichter und der Matrixstufe und zum anderen als Hilfsstufen für diesen Hauptzweig, den Farbträger-Oszillator, den Phasendiskriminator und die automatische Sperrspannung, auch als Farbtöter bezeichnet. Darüberhinaus dient zum Ausgleich der unterschiedlichen Laufzeiten zwischen dem Leuchtdichte- und Farbartsignal eine Verzögerungsleitung, die sich zwischen dem Leuchtdichte-Gleichrichter und dem Leuchtdichte-Verstärker befindet. Die Kippgeräte werden durch eine sogenannte Konvergenzstufe ergänzt. Diese Konvergenzstufe hat zur Aufgabe, über eine spezielle Konvergenz-Spuleneinheit dafür zu sorgen, daß an jedem Punkt des Bildschirmes die Strahlen der drei Elektronen-Kanonen der Farbbild-Maskenröhre zur Deckung gebracht werden.

VII. 1. Vergleich zwischen einem Schwarz/Weiß- und Farbempfänger

Um einen relativen Vergleich zwischen einem Schwarz/Weiß- und Farbempfänger zu erhalten, ist es zweckmäßig, sich zunächst beide Empfänger in der Darstellung als Blockschaltbild anzusehen. Man erhält hierbei gleichzeitig eine Gesamtübersicht über den erforderlichen Schaltungsaufwand und erkennt, daß der größte Teil der bisherigen Schwarz/Weiß-Empfängerstufen in allen Grundfunktionen erhalten bleibt und lediglich zusätzliche Farbempfängerstufen, mit den speziellen Eigenschaften für die Farbwiedergabe im Farbfernsehempfänger, hinzukommen. Wir betrachten deshalb zunächst das Blockschaltbild eines normalen Schwarz/Weiß-Fernsehemp-

fängers. In Abb. VII. 1. 1. sind die wichtigsten Funktionsstufen eingetragen.

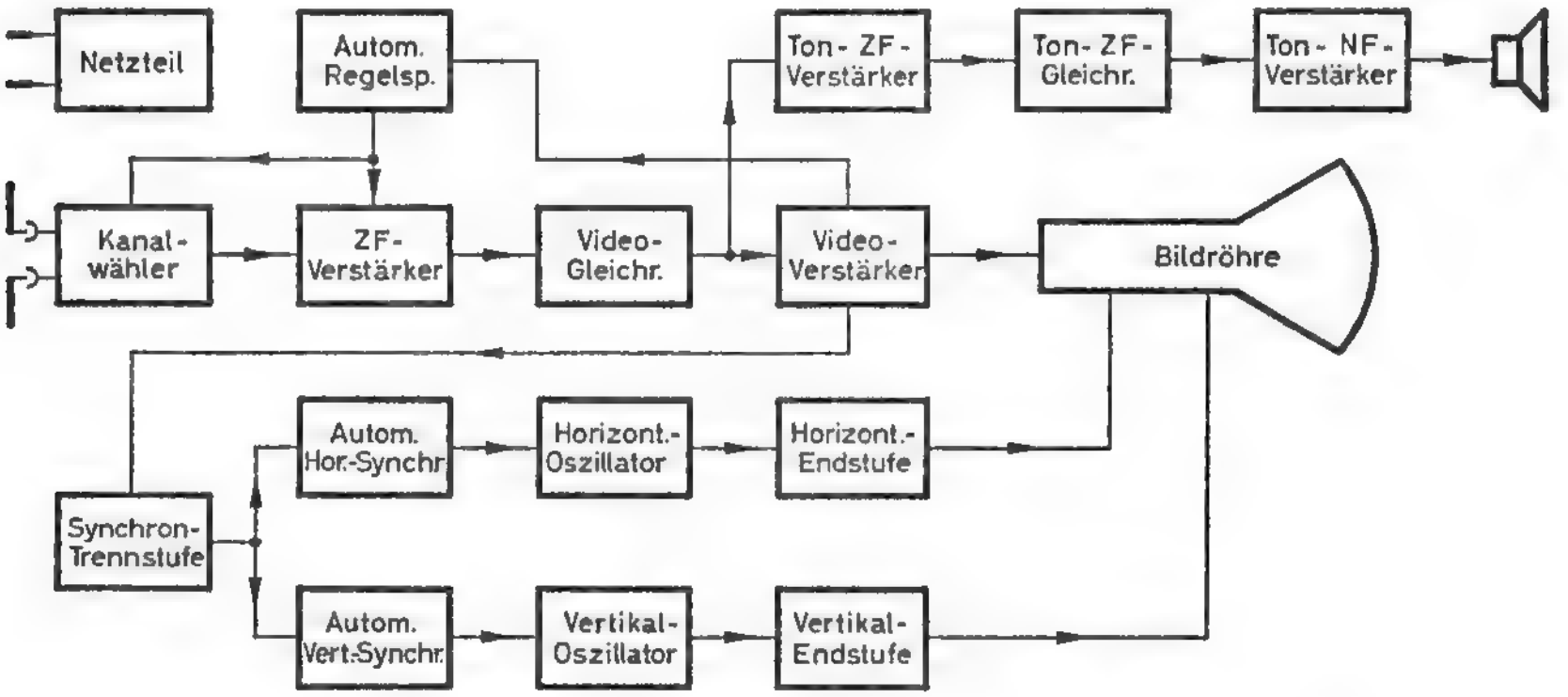


Abb. VII. 1. 1. Blockschaltbild eines Schwarz/Weiß-Fernsehempfängers.

Wenn man von den Hilfsstufen absieht, so kann man einen Schwarz/Weiß-Fernsehempfänger in drei Hauptzweige einteilen.

1. *Der Verstärkerzweig für das Bild- und Tonsignal*

   Dieser Zweig läuft von der Antenne über den Kanalwähler, ZF-Verstärker, Video-Gleichrichter und Video-Verstärker bis zur Bildröhre. Parallel dazu wird am Video-Gleichrichter bzw. Video-Verstärker die Intercarrier-Ton-ZF ausgekoppelt und über den Ton-ZF-Verstärker, den Ton-ZF-Gleichrichter und den Ton-NF-Verstärker bis zum Lautsprecher geführt.

2. *Die Horizontal-Ablenkung*

   Die Horizontal-Ablenkung wird nach der Synchronisations-Trennstufe durch die Horizontal-Synchronisationsstufe, den Horizontal-Oszillator und die Horizontal-Endstufe erzeugt und gesteuert.

3. *Die Vertikal-Ablenkung*

   Gleichfalls nach der Synchronisations-Trennstufe wird die Vertikal-Ablenkung mit Hilfe der Vertikal-Synchronisationsstufe, des Vertikal-Oszillators und der Vertikal-Endstufe vorgenommen.

Diese grundsätzliche Einteilung in Hauptfunktionsstufen ergibt in Form eines Blockschaltbildes für den Schwarz/Weiß-Fernsehempfänger 16 verschiedene Stufen. Betrachten wir jetzt das Blockschaltbild eines Farbfernsehempfängers, wie es in Abb. VII. 1. 2 eingezeichnet ist, so erkennen wir zunächst, daß, nach dem gleichen Grundprinzip aufgebaut und unterteilt,

statt der bisherigen 16 Schwarz/Weiß-Empfängerstufen insgesamt 25 Stufen vorhanden sind, wobei die neuen Farbstufen im Blockschaltbild durch eine stärkere Umrandung gekennzeichnet sind. Wir finden alle im Schwarz/Weiß-Fernsehempfänger vorhanden gewesenen Stufen im Blockschaltbild des Farbfernsehempfängers wieder. Statt der Bezeichnung Video-Gleichrichter bzw. Video-Verstärker erscheint im Farbfernsehempfänger an dieser Stelle der Begriff Leuchtdichte-Gleichrichter bzw. Leuchtdichte-Verstärker. Es läuft also wiederum von den Antennenklemmen das gesamte Bildsignal über den ZF-Verstärker, den Leuchtdichte-Gleichrichter und den Leuchtdichte-Verstärker bis zur Bildröhre. Mit diesem Leuchtdichtesignal, das an der Bildröhre eine Helligkeitssteuerung vornimmt, wird also zunächst für jedes beliebige Farbsignal der amplitudenrichtige Helligkeitswert wiedergegeben.

Zwischen dem Leuchtdichte-Gleichrichter und dem Leuchtdichte-Verstärker ist eine neue zusätzliche Stufe, die im Schwarz/Weiß-Empfänger nicht vorhanden war, angeordnet. Diese neue Stufe ist als Verzögerungsleitung bezeichnet.

Wie wir im nächsten Abschnitt sehen werden, muß das Leuchtdichtesignal gegenüber dem Farbartsignal, das an der Farbbildröhre die Farbsteuerung vornimmt, verzögert werden, da, bedingt durch die unterschiedliche Bandbreite zwischen dem Leuchtdichte- und Farbartsignal, in den

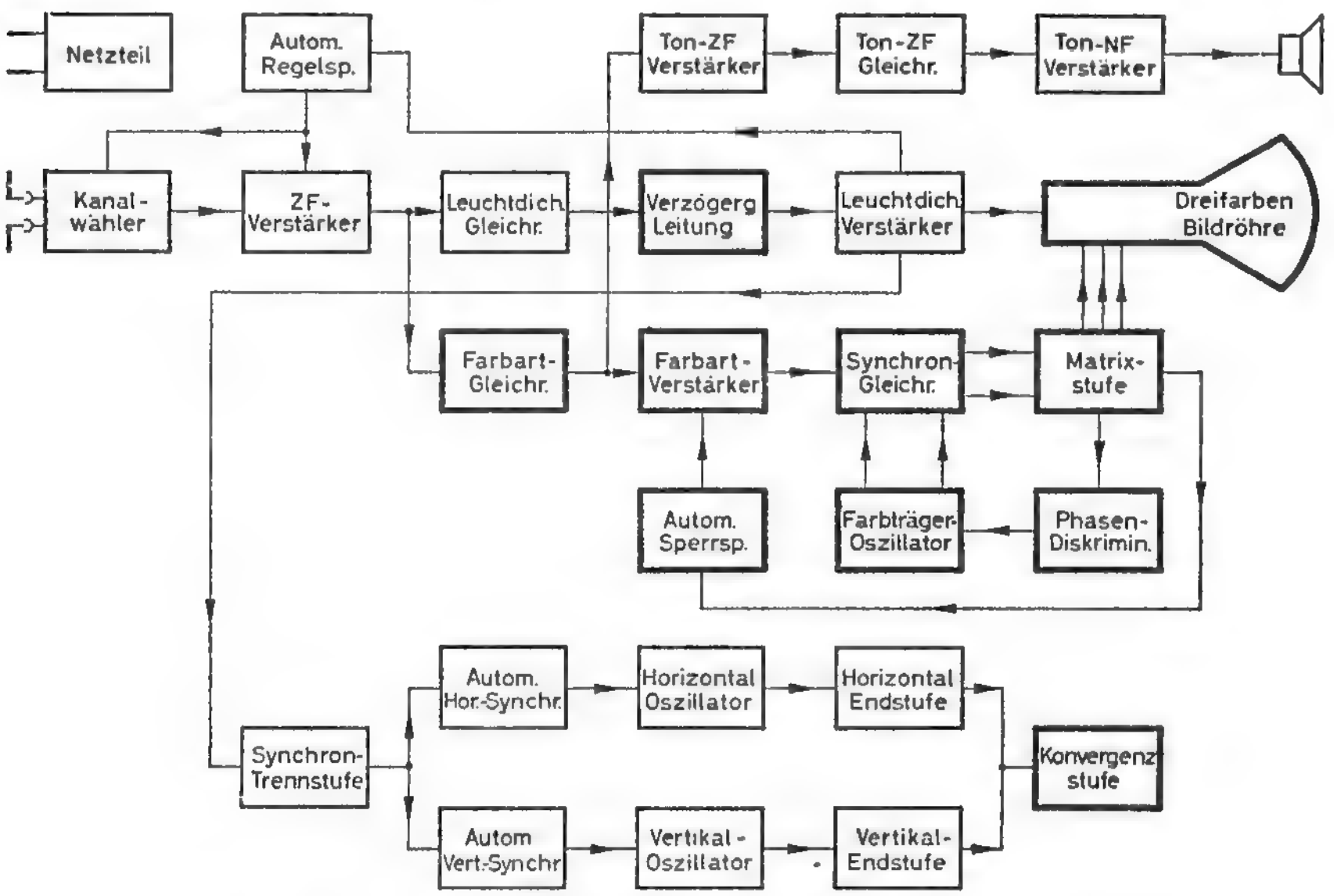


Abb. VII. 1. 2. Blockschaltbild eines Farb-Fernsehempfängers.

beiden Verstärkungszweigen unterschiedliche Laufzeiten vorhanden sind.

Für die Strahlablenkung der Bildröhre sind genauso wie im Schwarz-Weiß-Empfänger neben der Synchronisations-Trennstufe die gleichen Ablenk- und Kippgeräteschaltungen vorhanden. Im Ausgang der beiden Ablenkstufen befindet sich eine neue, im Schwarz/Weiß-Empfänger nicht vorhanden gewesene Stufe, die sogenannte Konvergenzstufe. Diese Konvergenzstufe hat zur Aufgabe, wie ausführlich in Kapitel VIII beschrieben wird, die Deckung der drei Elektronenstrahlen in der Dreifarben-Maskenbildröhre an jedem Punkt des Bildschirmes zu gewährleisten.

Neben den drei Hauptzweigen, die im wesentlichen mit dem bisherigen Schwarz/Weiß-Empfänger übereinstimmen, kommt ein neuer Hauptzweig als eine zusammenhängende Gruppe spezieller Farbempfangsstufen hinzu. Diese speziellen Farbempfangsstufen bestehen zunächst aus der Schaltungsgruppe für das Farbartsignal mit dem Farbart-Gleichrichter, dem Farbart-Verstärker, dem Synchron-Gleichrichter und der Matrixstufe. Das Farbartsignal wird dabei aus dem ZF-Verstärker ausgekoppelt und nimmt an der Bildröhre die Farbsteuerung über drei Elektronenstrahlen für die drei Primärfarben Rot, Grün und Blau vor.

Da vom Sender nur die Seitenbänder der Farbmodulation als Farbartsignal ausgestrahlt werden, muß im Farbempfänger zur Rückgewinnung der Farbspannungen der Farbträger wieder zugeführt werden. Hierzu braucht man einen Farbträgeroszillator, der meistens als Quarzoszillator ausgebildet ist. Diese im Empfänger erzeugte Farbträgerschwingung führt man zusammen mit dem Farbartsignal einer Synchrongleichrichterschaltung zu. Zur phasenrichtigen Steuerung der Synchrongleichrichtung muß der Farbträgeroszillator im Empfänger über eine Reaktanzröhre und einen Phasendiskriminator mit dem „Burst" des Sendersignals phasenstarr verkoppelt werden. Zusätzlich benötigt man noch eine automatische Sperrspannung, auch vielfach als sogenannter „Farbtöter" bezeichnet, um bei Schwarz/Weiß-Empfang bzw. bei Ausfall der Farbsynchronisation die Farbsteuerung abschalten zu können.

Vergleicht man also dieses Blockschaltbild eines Farbempfängers mit einem normalen Schwarz/Weiß-Empfänger, so sind, wenn man von der Verzögerungsleitung und der Konvergenzstufe absieht, 7 neue Farbempfangsstufen als vierter Hauptzweig hinzugekommen. Diese 7 zusätzlichen Farbempfangsstufen, nämlich Farbartgleichrichter, Farbartverstärker, Synchrongleichrichter, Matrixstufe, Automatische-Sperrspannung, Farbträgeroszillator und Phasendiskriminator, enthalten die speziellen Funktionen, die für die Farbsteuerung und damit für die Farbwiedergabe auf der Dreifarben-Maskenbildröhre nötig sind.

Hat ein Schwarz/Weiß-Empfänger mit seinen 16 Grundstufen heute ca. 20 Empfängerröhren, so enthält ein moderner Farbfernseh-Empfänger mit seinen 25 Grundstufen etwa 30 Empfängerröhren. Der elektrische Schaltungsaufwand und damit die elektrischen Bauteile eines Farbfernseh-Empfängers gegenüber einem Schwarz/Weiß-Empfänger sind etwa um 50% höher. Wenn man die recht komplizierte und umfangreiche Sender- und Empfangstechnik außer Betracht lassen würde, so ist rein vom Schaltungsaufwand her gesehen die Vergrößerung eines Farbfernseh-Empfängers gegenüber einem Schwarz/Weiß-Empfänger kleiner als man zunächst vermuten würde.

VII. 2. Funktionen der speziellen Farbstufen

Ohne zunächst auf Einzelheiten einzugehen, wollen wir uns mit den Grundfunktionen und den Aufgaben der speziellen Farbstufen beschäftigen. Im vorigen Abschnitt hatten wir schon gesehen, daß ein neuer Hauptzweig für das Farbartsignal vom ZF-Verstärker bis zur Bildröhre vorhanden ist. Die Farbsteuerung der Dreifarben-Maskenbildröhre erfolgt also auf zwei Wegen, einmal mit dem Leuchtdichtesignal und zum anderen mit dem Farbartsignal. Im ZF-Verstärker wird die Auftrennung zwischen Leuchtdichte- und Farbartsignal vorgenommen. Auf getrennten Wegen verstärkt liegt, wie wir nachher sehen werden, das Leuchtdichtesignal an den Katoden der Dreifarben-Maskenbildröhre und das Farbartsignal an den Steuergittern dieser Röhre. Da die Bandbreiten beider Verstärkungszweige unterschiedlich sind, nämlich für das Leuchtdichtesignal $U_Y = 5$ MHz und für das Farbartsignal U_F maximal 1,8 MHz, ergibt sich auch eine Laufzeit in diesen Kanälen, die voneinander abweicht. Grundsätzlich wird die Laufzeit eines Signales umso größer, je kleiner die Bandbreite des Verstärkers wird, wobei man ganz grob sagen kann, daß der relative Unterschied in der Laufzeit umgekehrt proportional der Bandbreite wird. Ein Verstärker mit 1,8 MHz Bandbreite hat also ca. die dreifache Laufzeit gegenüber einem Verstärker mit 5 MHz Bandbreite. Im Verstärkungskanal für das Leuchtdichtesignal muß also, wie in Abb. VII. 2. 1. angedeutet, eine Verzögerungsleitung eingeschaltet werden, damit sowohl für das Leuchtdichte- als auch Farbartsignal die gleiche Laufzeit bis zur Bildröhre vorhanden ist. Wird dies nicht gemacht, so gibt es an der Bildröhre keine phasenrichtige Farbsteuerung, die sich ja aus Leuchtdichte- und Farbartspannung zusammensetzt.

Um die Aufgaben des Verstärkungskanales für das Farbartsignal kennenzulernen, wollen wir uns zunächst ansehen, welches Signal über den Farbartgleichrichter, den Farbartverstärker, den Synchrongleichrichter und

die Matrixstufe bis zur Bildröhre läuft. Das Bildsignal des Farbfernsehsenders besteht aus dem Leuchtdichtesignal U_Y, dem Farbartsignal U_F und dem Synchronsignalgemisch. Nachdem dieses Signal über den Kanalwähler und ZF-Verstärker gelaufen ist, wird vom Farbartgleichrichter eine

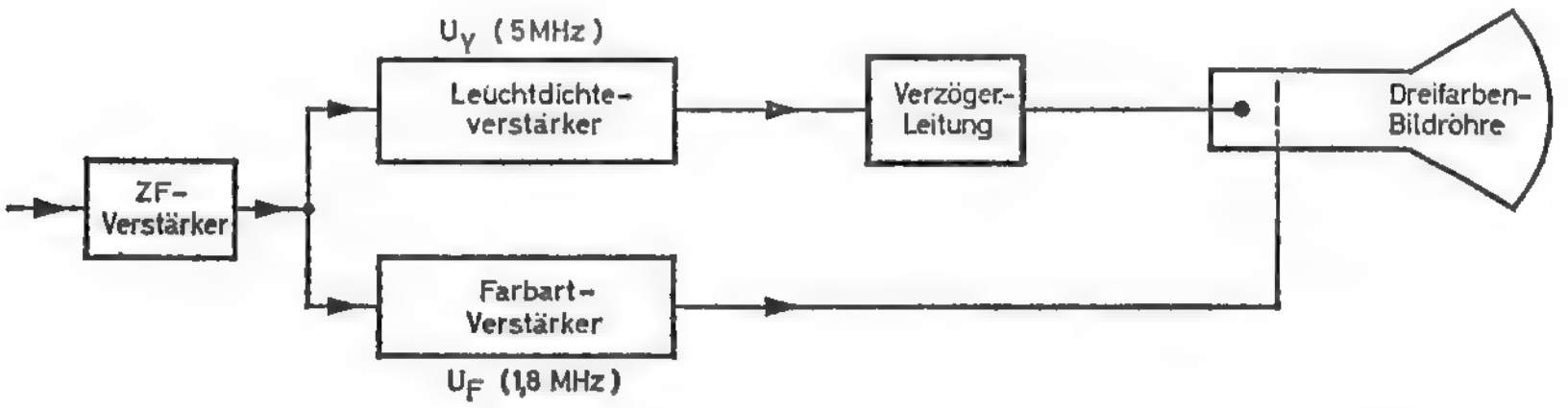


Abb. VII. 2. 1. Laufzeitausgleich zwischen Leuchtdichte- und Farbartsignal.

Differenzfrequenzbildung zwischen dem Bildträger und den Seitenbändern der Farbartmodulation vorgenommen. Da die Seitenbänder der Farbartmodulation symmetrisch zum vom Sender nicht mit ausgestrahlten Farbträger von 4,43 MHz liegen, entsteht nach dem Farbartgleichrichter symmetrisch zu 4,43 MHz das Seitenbandspektrum der Farbartmodulation.

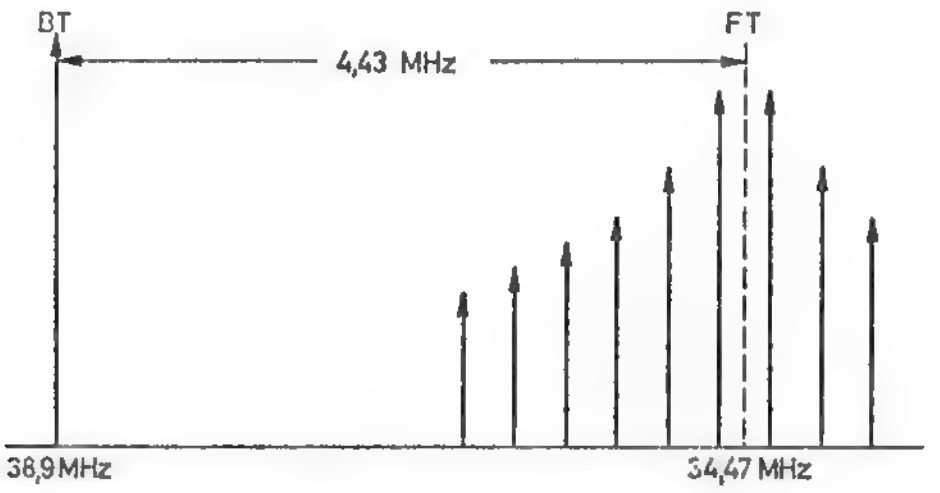


Abb. VII. 2. 2. ZF-Frequenzen von Bild- und Farbträger.

Aus Abb. VII. 2. 2. ist zu erkennen, daß bei einer Bildträger-ZF von 38,9 MHz die Farbträgerfrequenz bei 34,47 MHz liegt und symmetrisch dazu die Seitenbandfrequenzen der Farbartmodulation vorhanden sind. Genauso wie der Video-Gleichrichter eines Schwarz/Weiß-Empfängers aus dem Bild- und Tonträger die Intercarrierfrequenz mit 5,5 MHz als Differenzfrequenz beider Träger bildet, entsteht am Farbartgleichrichter als Differenzfrequenz zwischen Bild- und Farbträger das Farbartsignal mit 4,43 MHz. Es ist hierbei unwichtig, daß der Farbträger vom Farbfernsehsender nicht mit ausgestrahlt wird, da sich in gleicher Weise die Differenzfrequenzen aus den Seitenbändern des Farbträgers mit dem Bildträger bilden.

Aus der Abb. VII. 2. 3., in der die Prinzipschaltung des Farbartgleichrichters angegeben ist, erkennt man, daß der Farbartgleichrichter genauso aufgebaut ist wie der bisherige, vom Schwarz/Weiß-Empfänger her bekannte Video-Gleichrichter.

Der nach dem Farbartgleichrichter folgende Farbartverstärker hat die

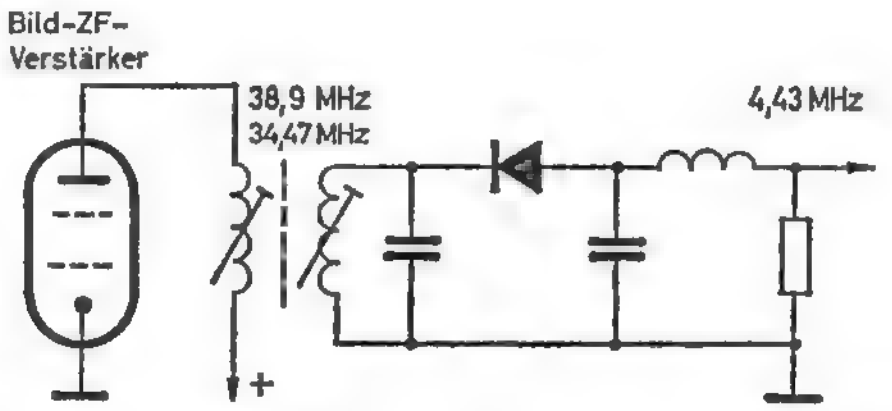


Abb. VII. 2. 3. Schema des Farbartgleichrichters.

Aufgabe, das Farbartsignal, welches als Seitenbandfrequenzen symmetrisch zu 4,43 MHz vorhanden ist, so weit zu verstärken, daß für die nachfolgende Synchrongleichrichtung eine genügend große Amplitude zur Verfügung steht. Dieser Farbartverstärker ist im Grunde genauso aufgebaut wie ein normaler Intercarrier-Ton-ZF-Verstärker des Schwarz/Weiß-Fernsehempfängers. Es ist also ein Bandfilterverstärker für die Mittenfrequenz von 4,43 MHz. Nach dem Farbartverstärker folgt die Gleichrichtung des Farbartsignals und damit die Rückgewinnung der Farbdifferenzspannungen, wie sie als Modulationsspannungen beim Sender zur Verfügung standen. Da das Farbartsignal nur aus den Seitenbandfrequenzen, also dem Modulationsprodukt des Farbträgers besteht, muß zur Gleichrichtung der Farbträger, phasensynchron mit der Trägerschwingung des Senders, wieder zugeführt werden. Dies kann man mit einer Synchrongleichrichterschaltung, wie wir sie näher in Kapitel X kennenlernen werden, vornehmen. Das Aus-

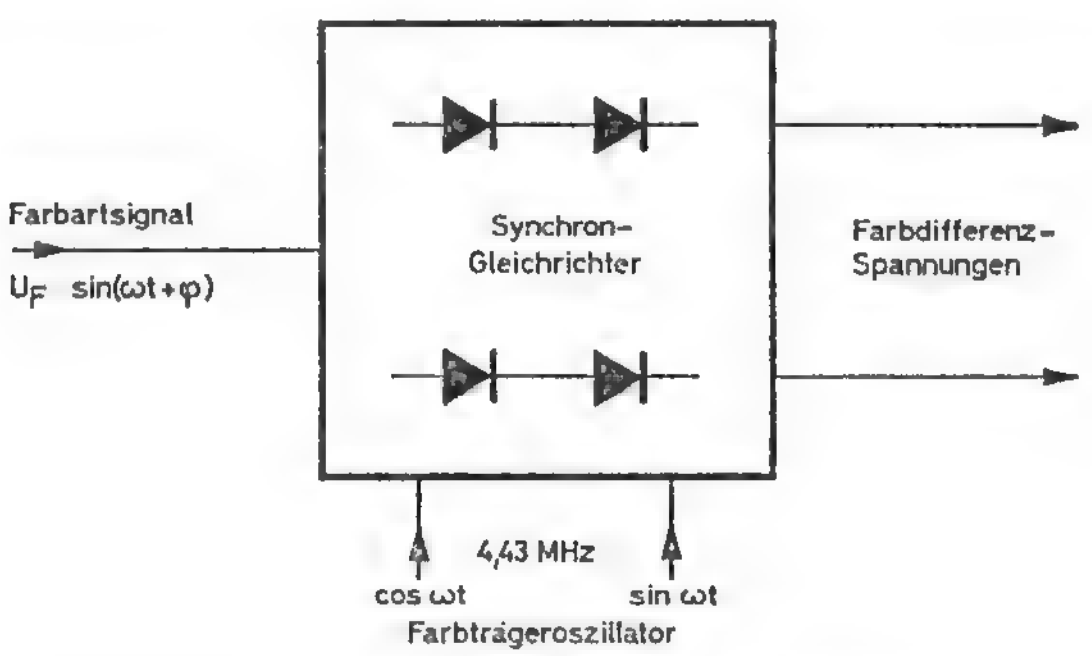


Abb. VII. 2. 4. Grundfunktion des Synchrongleichrichters.

gangssignal des Synchrongleichrichters enthält je nach Schaltungsauslegung entweder das I- und Q-Signal oder aber das $(R - Y)'$- und $(B - Y)'$-Signal. Die Grundfunktion des Synchrongleichrichters ist in Abb. VII. 2. 4. angegeben. Das Farbartsignal $U_F \cdot \sin(\omega t + \varphi)$ wird zwei vollkommen

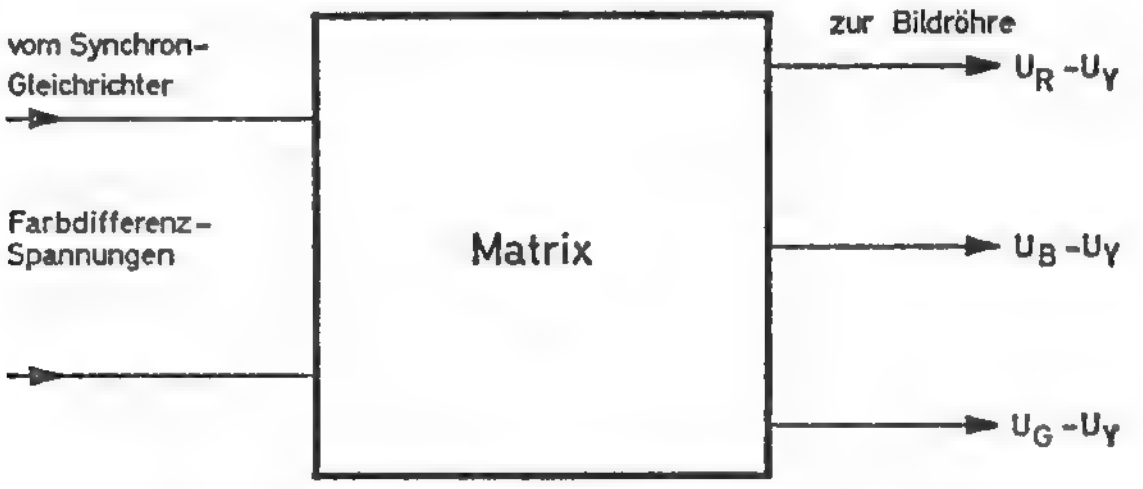


Abb. VII. 2. 5. Grundfunktion der Matrix.

gleichen Gleichrichterkreisen zugeführt. Die Phasenlage der zugeführten Farbträgerschwingung bestimmt dabei die Art der Farbdifferenzspannung am Ausgang des Synchrongleichrichters.

Die Ausgangssignale des Synchrongleichrichters werden dann einer Matrixstufe zugeführt. In dieser Matrixstufe werden die Farbdifferenzspannungen $U_R - U_Y$, $U_B - U_Y$ und $U_G - U_Y$ gebildet. Die Matrix-

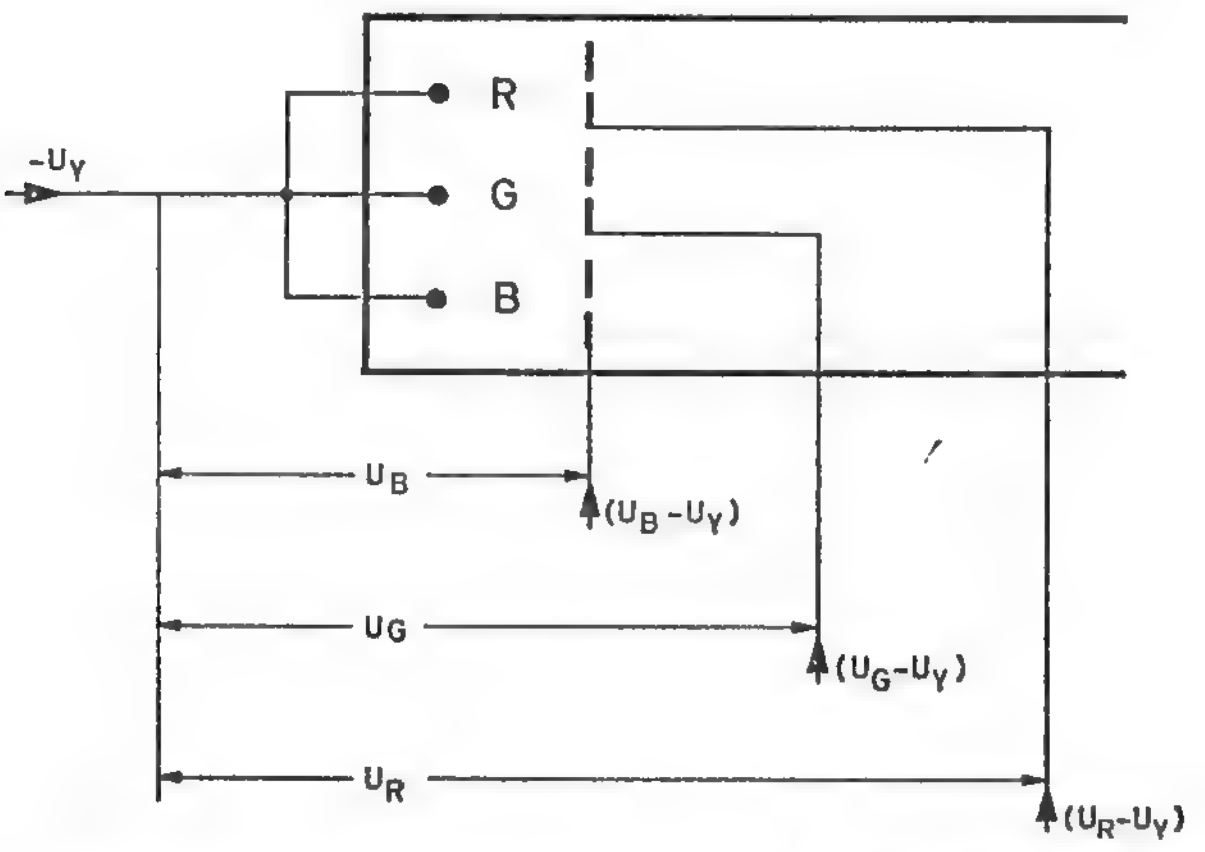


Abb. VII. 2. 6. Ansteuerungsschema einer Dreifarbenbildröhre.

stufe ist dabei genauso wie beim Sender aus verschiedenen Spannungsteilern aufgebaut, damit aus den Farbdifferenzspannungen, die der Synchrongleichrichter liefert, [U_I und U_Q oder $(U_R - U_Y)'$ und $(U_B - U_Y)'$]

die drei Ansteuerspannungen für die Dreifarbenbildröhre erhalten werden. Dies ist in Abb. VII. 2. 5. angedeutet.

Alle drei Farbdifferenzspannungen werden je einem Steuergitter der Dreifarbenbildröhre zugeführt. An den Katoden dieser Dreifarbenbildröhre liegt das Leuchtdichtesignal U_Y, so daß als wirksame Steuerspannung U_{st}, wie in Abb. VII. 2. 6. angedeutet, zwischen Gitter und Katode jeweils die Primärfarbspannung U_R, U_B und U_G wirksam ist.

Sehen wir uns diesen Weg des Farbartsignals für die einzelnen Frequenzumwandlungen im Empfänger noch einmal geschlossen an, so erkennen wir, daß insgesamt eine dreimalige Frequenzumwandlung erfolgt. Dies ist im Grundschema in Abb. VII. 2. 7. dargestellt.

Die HF-Trägerfrequenz des Senders wird zunächst im Kanalwähler des Empfängers durch Mischung auf die Bild-ZF umgesetzt. Der Bildträger erhält die Frequenz 38,9 MHz und der Farbträger 34,47 MHz. Nach der ZF-Verstärkung wird durch Gleichrichterwirkung aus dem Bild- und Farbträger die Differenzfrequenz von 4,43 MHz gebildet und anschließend im

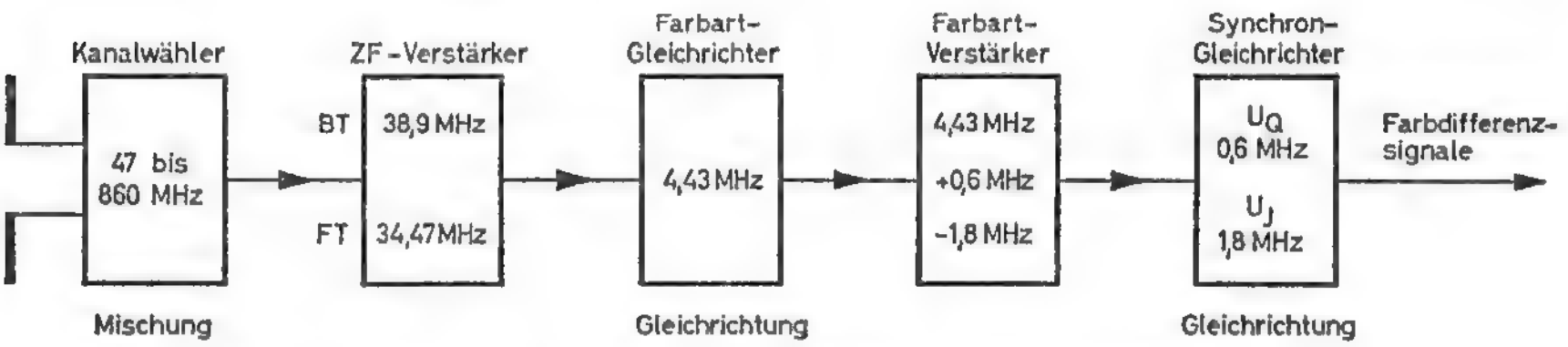


Abb. VII. 2. 7. Frequenzumsetzung des Farbartsignals.

Farbartverstärker verstärkt. Diese zweite Frequenzumsetzung über die Gleichrichtung im Farbartgleichrichter könnte man auch als zweite ZF-Bildung ansehen. Im Synchrongleichrichter erfolgt dann wiederum durch Gleichrichterwirkung die Rückgewinnung des Farbart-NF-Signals, wie es ursprünglich an der Aufnahmekamera des Senders vorhanden war. Das Q-Signal hat dabei den Frequenzumfang bis 600 kHz und das *I*-Signal enthält als höchste Modulationsfrequenz 1,8 MHz.

Als weitere Farbstufen sind noch der Farbträgeroszillator, der Phasendiskriminator, die Automatische-Sperrspannung und die Konvergenzstufe vorhanden. Bei dem Farbträgeroszillator handelt es sich um einen Quarzoszillator, der die Farbträgerfrequenz von 4,43 MHz erzeugt. Zur phasenstarren Synchronisierung dieser Farbträgerschwingung wird eine Diskriminatorschaltung benötigt. Diese Diskriminatorschaltung erzeugt, gesteuert vom Farbträgersynchronsignal des Senders, dem sogenannten „Burst", eine Regelspannung, die über eine Reaktanzröhrenschaltung den Farbträger-

oszillator phasenstarr mit der Farbträgerschwingung des Senders synchronisiert. Es ist dies das gleiche Grundprinzip wie bei der Horizontalsynchronisierung im Schwarz/Weiß-Empfänger über Horizontal-Generator, Reaktanzröhre und Phasenvergleich. In der Abb. VII. 2. 8. ist das Grundprinzip angedeutet.

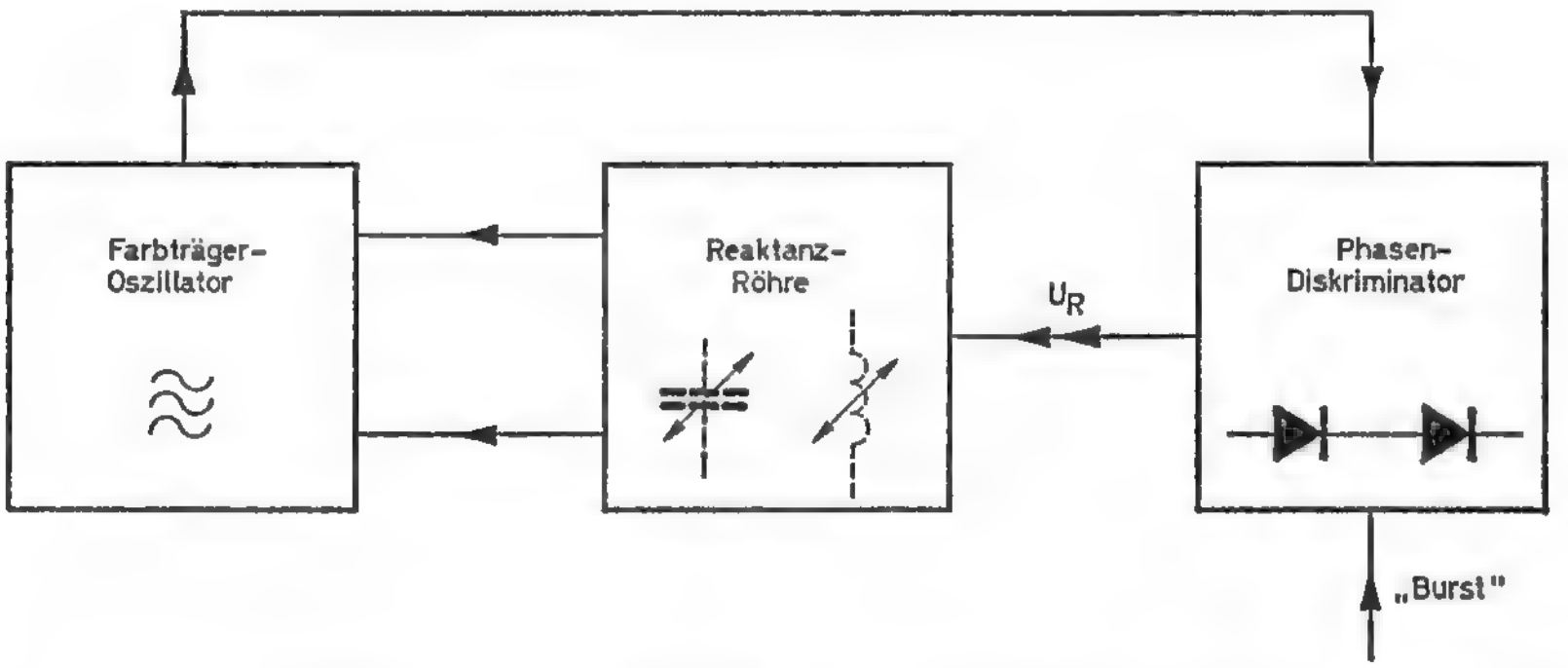


Abb. VII. 2. 8. Phasenstarre Verkopplung des Farbträger-Oszillators mit der Farbträgerschwingung des Senders.

Wenn der Farbempfänger ein Schwarz/Weiß-Signal empfängt, oder aber das Farbsynchronsignal des Senders ausfällt, wird über eine Sperrspannungsschaltung, die auch als „Farbtöterschaltung" bezeichnet wird, der gesamte Farbartkanal gesperrt und damit abgeschaltet. Die Farbbildröhre erhält also dann als Steuerspannung an der Katode nur das Leuchtdichtesignal U_Y und gibt damit ein helligkeitsrichtiges Schwarz/Weiß-Bild wieder.

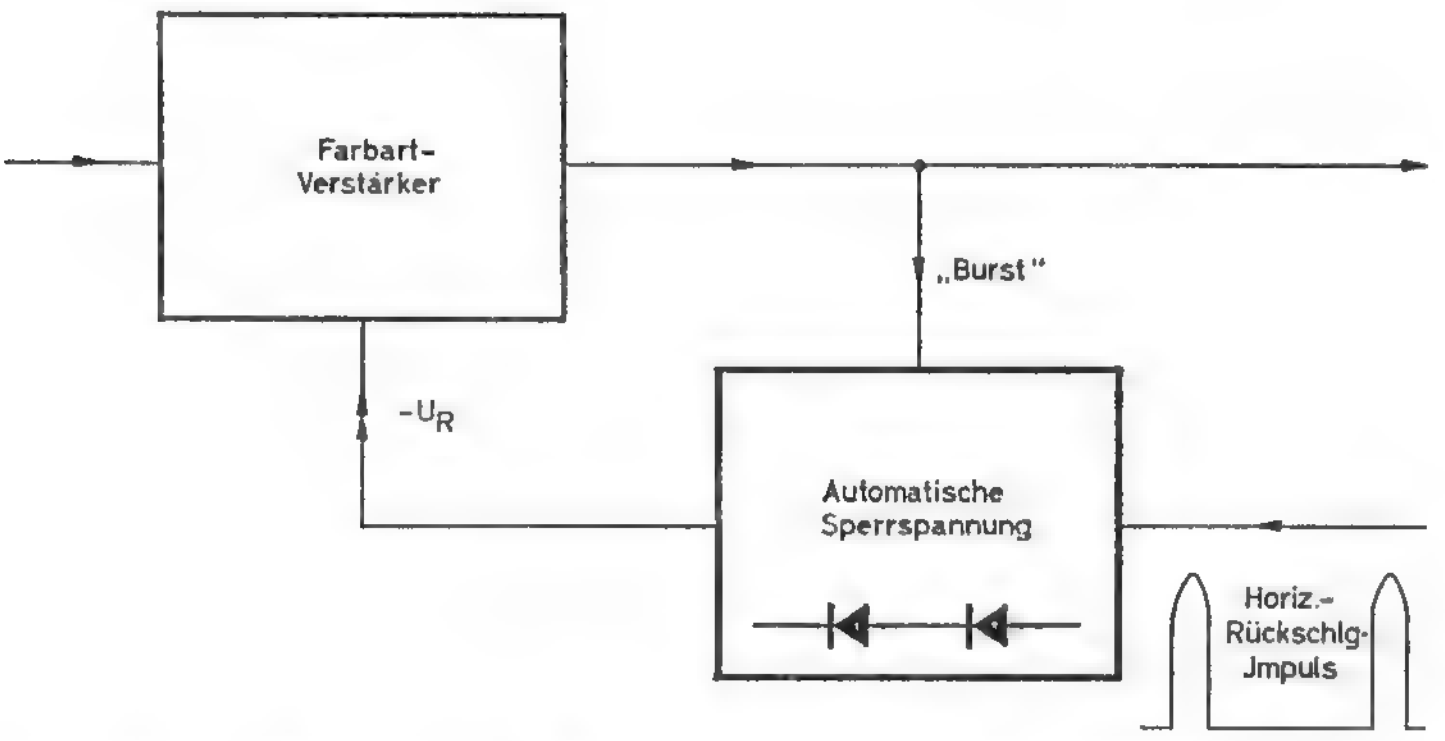


Abb. VII. 2. 9. Erzeugung der automatischen Sperrspannung in Abhängigkeit vom „Burst".

Wie man aus Abb. VII. 2. 9. erkennt, wird die Automatische-Sperrspannungs-Schaltung vom „Burst“ des Farbartsignals gesteuert und mit dem Horizontal-Rückschlagimpuls aufgetastet. Ist im Farbartsignal kein Synchron-Schwingungszug, nämlich der „Burst“, vorhanden, so liefert die Automatische-Sperrspannung eine negative Regelspannung, die den Farbartverstärker sperrt. Häufig wird diese Sperrspannungsschaltung dazu mitbenutzt, eine Regelspannung für den Farbartverstärker zu erzeugen, die dann zur zusätzlichen Konstanthaltung der Farbsättigung dient.

Neben diesen, für die Farbsteuerung der Farbbildröhre benötigten Farbstufen ist für die Ablenkschaltungen noch eine zusätzliche Konvergenzstufe erforderlich. Da die Dreifarben-Maskenbildröhre drei Elektronenkanonen besitzt, müssen an jedem Punkt des Bildschirmes die drei Elektronenstrahlen zur Deckung gebracht werden. Über eine spezielle Konvergenzspulenanordnung am Röhrenhals muß also jeweils ein zusätzliches Ablenkfeld erzeugt werden, wodurch immer gewährleistet wird, daß die drei Elektronenstrahlen der drei getrennten Elektronenkanonen für die Primärfarben Rot, Grün und Blau sich in einem Punkt in der Maske der Dreifarbenbildröhre treffen.

Die hiermit zusammenhängenden einzelnen Probleme werden wir in Kapitel VIII noch näher kennenlernen.

Zusammenfassung

Vergleicht man die Blockschaltbilder eines Schwarz/Weiß- und eines Farbempfängers miteinander, so erkennt man, daß alle Hauptstufen des Schwarz/Weiß-Empfängers in den gleichen Grundfunktionen auch im Farbempfänger vorhanden sind. Darüberhinaus sind zusätzliche Farbstufen im Farbempfänger erforderlich, die die spezielle Farbsteuerung an der Farbbildröhre vornehmen. Diese speziellen Farbstufen wandeln das Farbartsignal der Bildträgerspannung des Senders in die Ausgangsform $U_R - U_Y$, $U_B - U_Y$ und $U_G - U_Y$ zur Farbsteuerung der Bildröhre zurück. Die Farbträgererzeugung wird im Empfänger mit einem Quarzoszillator vorgenommen, der über eine Reaktanzröhrenschaltung von einem Diskriminator phasenstarr mit der Trägerschwingung des Senders verkoppelt wird. Die Konvergenzstufe am Ausgang der beiden Ablenkstufen sorgt durch zusätzliche Ablenkfelder in einer speziellen Konvergenzeinheit für die richtige Deckung der drei Elektronenstrahlen an jedem beliebigen Punkt der Bildröhrenmaske.

KAPITEL VIII

DIE FARBFERNSEH-BILDRÖHRE

Übersicht

Es werden zunächst die grundsätzlichen Möglichkeiten der Farbwiedergabe im Farbempfänger mit Hilfe von Farbbildröhren angedeutet. Neben der Projektionstechnik gibt es zwei Grundprinzipien für den Aufbau der Farbbildröhren. Das eine Prinzip benutzt Einstrahl-Röhren, wobei, durch ein spezielles Farbsteuerungsverfahren gelenkt, der Elektronenstrahl drei verschiedene Leuchtstoffe überstreichen muß. Die Farbwiedergabe erfolgt also in einem Sequenz-Verfahren. Die wichtigsten nach diesem Prinzip arbeitenden Röhren sind die „Apple-Tube", „Zebra-Tube", „Lawrence-Tube" oder „Chromatron" und „Banana-Tube". Alle diese Röhrentypen konnten sich jedoch bisher noch nicht für eine Massenfertigung durchsetzen.

Nach dem zweiten Grundprinzip, mit einer Dreistrahl-Röhre, arbeitet die Lochmasken-Röhre (Shadow-mask). Hierbei entfällt die Notwendigkeit einer speziellen Farbsteuerung des Elektronenstrahls, da für jeden der drei Elektronenstrahlen entsprechend zugeordnete Leuchtschichtpunkte vorhanden sind. Es liegt hier also ein Farbdeckungsproblem vor, wobei die Farbwiedergabe simultan erfolgt. Da bisher nur Farbempfänger, die die Farbbildröhre nach dem Lochmaskenprinzip besitzen, in der Massenfertigung hergestellt wurden, wird die Arbeitsweise dieser Röhre ausführlicher erklärt. Neben der Beschreibung des Aufbaues der Lochmasken-Bildröhre mit der Leuchtstoffschicht aus Farbtripeln, die aus roten, grünen und blauen Phosphor- bzw. Sulfid-Leuchtstoffen bestehen, und der dazugehörigen Lochmaske wird die Arbeitspunkteinstellung erläutert. Das Problem der Farbdeckung, der sogenannten Konvergenz, wird in zwei Hauptgruppen, nämlich in die statische Konvergenz und in die dynamische Konvergenz unterteilt. Die notwendige Regelmöglichkeit dieser Konvergenz, d.h. an allen Punkten des Bildschirmes eine Deckung der drei Elektronenstrahlen in der Ebene der Lochmaske zu erzielen, wobei jeder Elektronenstrahl nur die Leuchtstoffpunkte seiner zugehörigen Farbgruppierung treffen darf, bedingt eine zusätzliche Konvergenzspuleneinheit am Hals der Bildröhre. Durch einstellbare Sägezahn- und Parabelströme mit

Vertikal- und Horizontalablenkfrequenz, die durch die Spulen der Konvergenzeinheit fließen, können die verschiedenen Abbildungsfehler kompensiert werden. Es wird eine komplette Schaltung angegeben, mit der alle zwölf erforderlichen Regelvorgänge ausgeführt werden können. In einem Anhang ist zusätzlich eine einfache grafische Methode zur Ableitung differenzierter Spannungs- und Stromformen angegeben.

VIII. 1. Verschiedene Bildröhrenarten

Die Wiedergabe farbiger Bilder im Empfänger läßt sich theoretisch auf mannigfache Art durchführen. Angefangen mit der Benutzung von drei Farbröhren für je eine Primärfarbe, deren Bilder dann durch Projektion zur Deckung gebracht werden, über Bildröhren mit einer Elektronenkanone, deren Elektronenstrahl durch Steuereinrichtungen über drei verschiedene Leuchtstoffe geführt wird, bis zur Bildröhre mit drei Elektronenkanonen, wobei die drei Elektronenstrahlen nur jeweils die ihr zugehörigen Leuchtstoffpunkte treffen können, hat man alle diese Wiedergabemöglichkeiten labormäßig erprobt. Trotz der vielen möglichen Bildröhrentypen hat sich für die Heimempfänger bisher jedoch nur die sogenannte Lochmaskenröhre, eine Bildröhre mit drei Elektronenkanonen, durchgesetzt. Sie besitzt eine Leuchtstoffschicht, die aus einzelnen Farbtripeln mit einem roten, grünen und blauen Farbpunkt besteht. Davor ist eine Lochmaske angeordnet, deren Löcher jeweils genau im Mittelpunkt der einzelnen Farbtripeln liegen. Obgleich die Fertigung und die Einstellungen dieser Lochmasken-Farbbildröhre sehr aufwendig sind und eine große Genauigkeit erfordern, damit eine einwandfreie Farbwiedergabe über die Anregung von drei verschiedenen Leuchtstoffen erfolgen kann,haben sich bei allen anderen Farbbildröhrentypen gleich große technische Probleme ergeben. Neben der Lochmaskenröhre, die im nächsten Abschnitt ausführlicher besprochen wird, soll deshalb zunächst ein kurzer Überblick über die wichtigsten Bildröhrentypen gegeben werden, die eine spezielle Farbsteuerung benötigen und von denen bereits funktionsfähige Labormuster existieren. Es wird hierbei gleichzeitig deutlich, daß trotz der vorbildlich gelösten hochfrequenzmäßigen Übertragungstechnik der Farbfernsehnorm für die Farbwiedergabe im Empfänger noch keine Bildröhre gefunden wurde, die elektronisch gesteuert ein einwandfreies Farbbild erzeugt, ohne daß die Herstellungskosten und der erforderliche Schaltungsaufwand zu groß werden und gleichzeitig in einer Massenfertigung keine unüberwindlichen Schwierigkeiten auftreten.

1. *Projektion mit drei Farbröhren*

Das von der Wiedergabetechnik her einfachste Verfahren, ein Farbbild, zusammengesetzt aus den drei Primärfarben, zu erzeugen, liegt zweifellos in der Verwendung von drei Farbbildröhren, deren Bilder durch eine Projektion zur Deckung gebracht werden. In Abb. VIII. 1. 1. ist dieses Grundprinzip angedeutet.

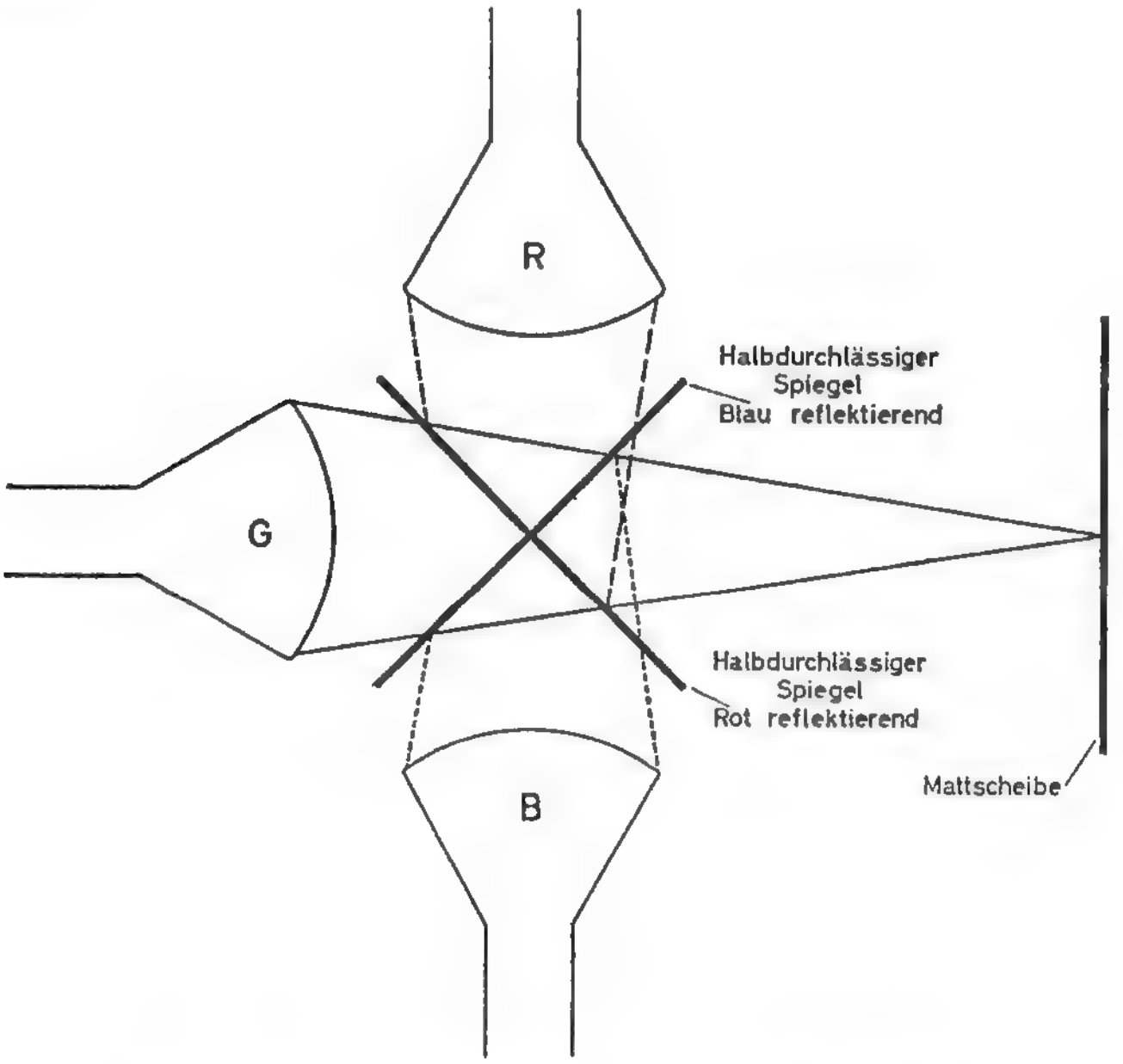


Abb. VIII. 1. 1. Projektion mit drei Farbröhren.

Je eine Farbröhre mit einer Leuchtstoffschicht in den Farbtönen der Primärfarben Rot, Grün und Blau wird zusammen mit zwei sich kreuzenden, halbdurchlässigen Spiegeln so angeordnet, daß auf einer Mattscheibe die Bilder der drei Farbröhren zur Deckung gebracht werden.

Es ist dies das gleiche Grundprinzip, das wir bereits in Kapitel II bei der Aufteilung des weißen Lichtes über halbdurchlässige Spiegel für die drei Aufnahmeröhren der Farbkamera kennenlernten. Das rote Licht der roten Farbröhre wird vom „Rot" reflektierenden Spiegel auf die Mattscheibe geworfen, während dieser „Rot" reflektierende Spiegel das von der grünen und blauen Farbröhre kommende Licht durchläßt. Das blaue Licht der blauen Farbröhre wird vom „Blau" reflektierenden Spiegel gleichfalls auf die Mattscheibe geworfen, während das grüne Licht der grünen Farbröhre ungehindert durch beide Spiegel hindurchdringt und zur Mattscheibe ge-

langt. Selbstverständlich können die Bilder der drei Projektionsröhren auch direkt auf eine Leinwand projiziert werden, wodurch die halbdurchlässigen Spiegel entfallen. Diese Möglichkeit der Farbwiedergabe mit drei Farbröhren über je eine Projektionseinheit wird praktisch angewandt in der Großprojektionstechnik.

Mit der in Abb. VIII. 1. 2. (S. 97) dargestellten Philips-Farbbild-Großprojektionsanlage Typ EL 5795 ist es z.B. möglich, farbige Projektionsbilder bis zur Größe von 5 x 4 Metern zu projizieren. Es werden hierbei drei Projektionseinheiten mit je einer Schmidt-Optik benutzt. Die Projektionsröhren sind dabei Röhren mit 13 cm Schirmdurchmesser vom Typ MG 13-38, MU 13-38 und MY 13-38, die jeweils mit 50 kV betrieben werden. Für Heimgeräte hat sich im größeren Rahmen dieses Prinzip der Projektion farbiger Bilder bisher nicht durchgesetzt, da einmal die Abmessungen der Geräte übermäßig groß werden und zum anderen die Kosten für drei komplette Schmidt-Optiken verhältnismäßig hoch sind.

2. *„Lawrence- oder Chromatron"-Röhre*

Will man mit einer normal aufgebauten Direktsicht-Bildröhre farbige Bilder wiedergeben, so muß man eine Leuchtstoffschicht benutzen, die aus drei Leuchtstoffen in den drei Primärfarben besteht und ein spezielles Steuerungssystem besitzt, damit die drei getrennten Leuchtstoffe jeweils farbrichtig angesteuert werden. Bei der „Lawrence- oder Chromatron"-Röhre wird das Problem so gelöst, daß die Leuchtstoffschicht aus horizontalen Streifen besteht, die abwechselnd in den Primärfarben Rot, Grün, Blau, wie in Abb. VIII. 1. 3. (S. 115) dargestellt, angeordnet sind.
Die Reihenfolge der Streifen ist dabei so vorgenommen, daß zwischen einem roten und blauen Streifen ein grüner Streifen zu liegen kommt. Hierdurch erhält man gegenüber den roten und blauen Streifen die doppelte Anzahl grüner Streifen. Bei einer 21″-Bildröhre z.B. sind ca. 500 grüne und je 250 blaue und rote Streifen vorhanden. Die Röhre besitzt nur eine Elektronenkanone, und es muß der Elektronenstrahl so gesteuert werden, daß er nacheinander die drei Farbstreifen treffen kann. Die Farbwiedergabe in der „Lawrence- oder Chromatron"-Röhre wird also nicht simultan wie die HF-Übertragung, sondern zeitlich nacheinander in einem Sequenz-Verfahren vorgenommen. Die Steuerung des Elektronenstrahls übernimmt ein Farbgitter. Dieses Farbgitter sitzt ca. 10 mm vor der Leuchtstoffschicht und besteht aus waagerechten dünnen Drähten, die sich vor den roten und blauen Farbstreifen befinden. Alle Drähte vor den roten Streifen sind elektrisch parallel zusammengefaßt und gleichfalls alle Drähte vor den blauen Streifen. Das elektrische Potential der Leuchtschichtstreifen beträgt ca.

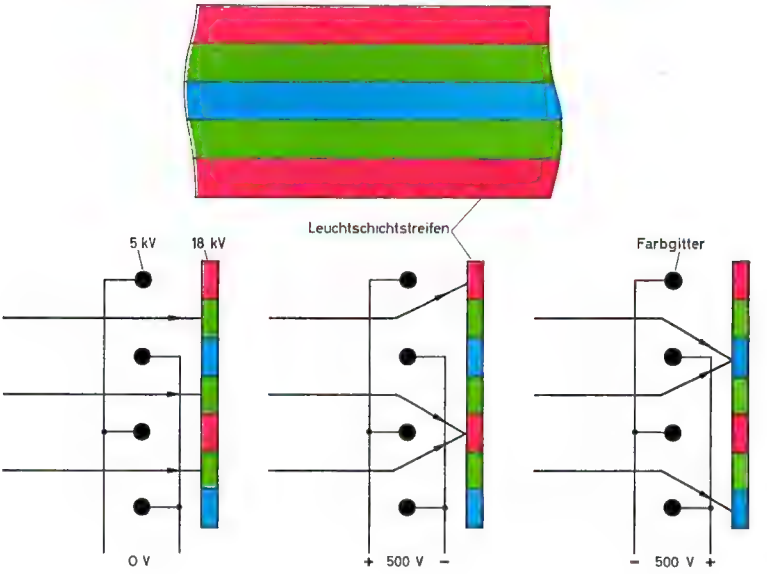


Abb. VIII. 1. 3. Aufbau der „Lawrence- oder Chromatron"-Röhre.

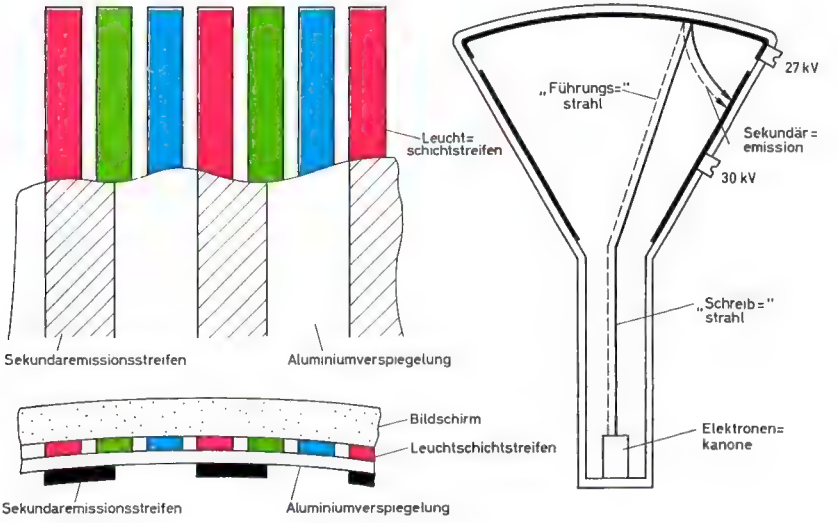


Abb. VIII. 1. 4. Aufbau der Index-Röhre „Apple-Tube".

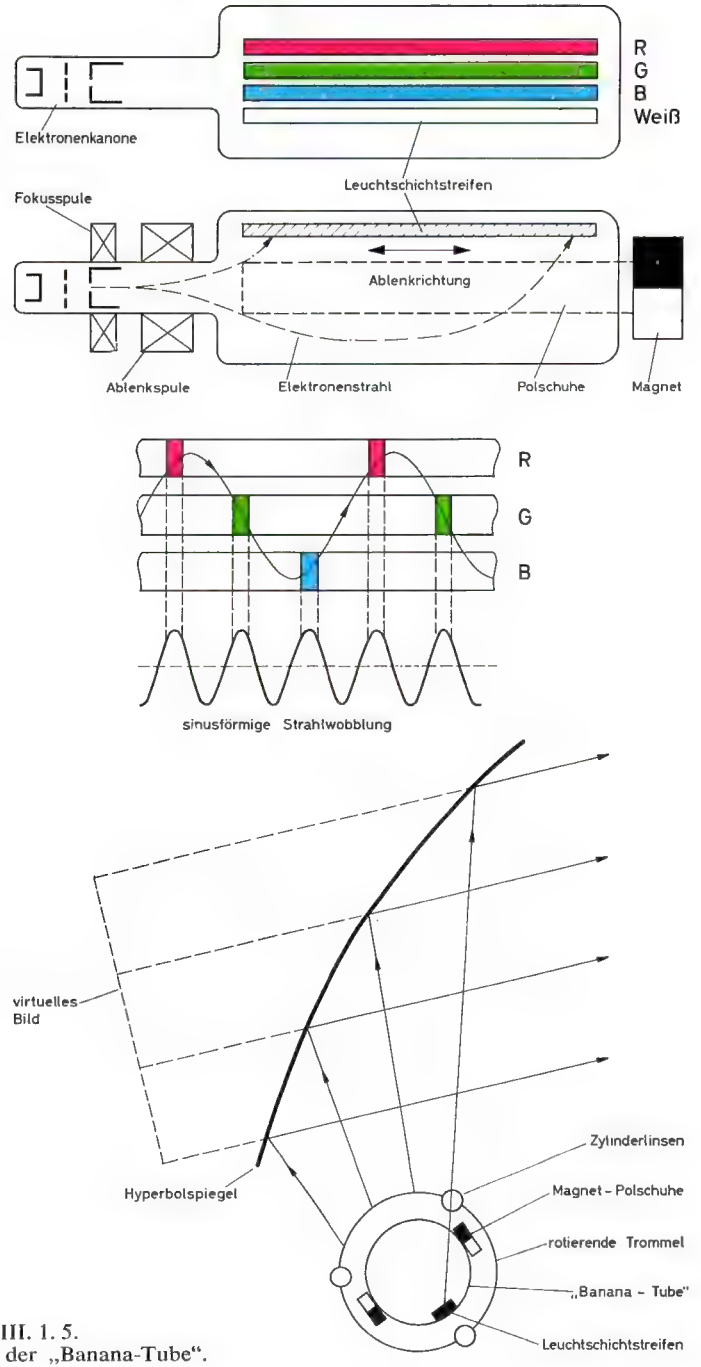


Abb. VIII. 1. 5.
Aufbau der „Banana-Tube".

18 kV und des Farbgitters ca. 5 kV. Zusätzlich kann zwischen den beiden Farbgittern für die roten und blauen Farbstreifen eine Spannungsdifferenz von ca. 500 Volt umgeschaltet werden. Diese Spannungsdifferenz zwischen den beiden Farbgittern baut ein elektrisches Feld auf, das je nach Polung eine entsprechende Beugung des Elektronenstrahls vornimmt. Ist z.B. die Spannungsdifferenz zwischen beiden Farbgittern Null, so wird der Elektronenstrahl ohne Ablenkung auf geradem Wege durch das Farbgitter hindurchtreten und nur jeweils die grünen Farbstreifen treffen. Ist jedoch das rote Farbgitter um 500 Volt positiver als das blaue Farbgitter, so wird der Elektronenstrahl zum positiveren Gitter hin abgelenkt. Dies bedeutet, daß der Elektronenstrahl jetzt nur die roten Farbstreifen treffen kann. Wenn umgekehrt das blaue Farbgitter um 500 Volt positiver als das rote Farbgitter ist, findet eine Beugung des Elektronenstrahles derart statt, daß jetzt nur die blauen Farbstreifen getroffen werden. Durch eine Potentialsteuerung der beiden Farbgitter kann man also den Elektronenstrahl entweder auf den grünen, roten oder blauen Farbstreifen schalten. Diese Umschaltung des Farbgitters kann grundsätzlich entweder mit der Vertikal-Ablenkfrequenz, also rastermäßig, oder mit der Horizontal-Ablenkfrequenz, also zeilenmäßig, bzw. mit einer wesentlich höheren Frequenz, z.B. mit der Farbträgerfrequenz, erfolgen. Im letztgenannten Fall wird diese Umschaltung so vorgenommen, daß der Elektronenstrahl sinusförmig über die drei Leuchtschichtstreifen geführt wird, so daß man von einer Elektronenstrahlwobbelung sprechen könnte. Mit der gewählten Umschaltfolge des Farbgitters muß dann synchron der Ausgang der Farbsignalverstärker umgeschaltet werden, damit, abhängig von der Lage des Elektronenstrahles, die jeweils richtige Farbwiedergabe erfolgen kann.

3. *Index-Röhren*

Ein ähnliches Prinzip wie bei der Lawrence-Röhre wird in den sogenannten Index-Röhren angewandt. Diese Index-Röhren, bekanntgeworden als „Apple-Tube“ und „Zebra-Tube“, benutzten zur Elektronenstrahlsteuerung kein umschaltbares Farbgitter, sondern verwenden zusätzliche Indexstreifen, über die die notwendige elektronische Umschaltung der Farbsignalverstärker vorgenommen wird.

In Abb. VIII. 1. 4. (S. 115) ist schematisiert der Aufbau einer „Apple-Tube“ angedeutet. Es werden als Leuchtstoffschicht wiederum einzelne Leuchtschichtstreifen benutzt. Diese Leuchtschichtstreifen sind senkrecht zur Horizontal-Ablenkung angeordnet und es befindet sich zwischen ihnen jeweils ein nichtausgefüllter Zwischenraum. Die Reihenfolge der Streifen entspricht den Primärfarben Rot, Grün, Blau, so daß von jeder Primär-

farbe gleichviel Streifen vorhanden sind. Diese Leuchtschichtstreifen sind, genau so wie die Leuchtstoffschicht der Schwarz/Weiß-Bildröhre, mit einer Aluminium-Verspiegelung versehen. Auf der Rückseite dieser Aluminium-Verspiegelung befinden sich als Indexstreifen senkrechte Sekundär-Emissions-Streifen.

Die Elektronenkanone dieser Bildröhre erzeugt zwei getrennte Elektronenstrahlen, wobei der eine Elektronenstrahl der normale Schreibstrahl ist und mit dem Farbsignal moduliert wird, während der zweite Elektronenstrahl, als sogenannter Führungsstrahl benutzt, nur eine sehr geringe, aber konstante Stromdichte aufweist. Beide Elektronenstrahlen werden parallel geführt und gleichmäßig abgelenkt. Beim Überstreichen der Leuchtschichtstreifen wird vom Führungsstrahl, der ständig eine konstante Stromstärke besitzt, ein impulsförmiges Raster erzeugt. Dieses impulsförmige Raster wird durch die Sekundär-Emissionsstreifen entsprechend verstärkt in den Bildröhrenkolben zurückgestrahlt. Das Innere des Bildröhrenkolbens ist mit einer leitenden Schicht bedampft, wobei das Potential dieser Schicht 30 kV beträgt, während die Leuchtstoffschicht mit der Aluminiumverspiegelung ein Potential von 27 kV besitzt. Das impulsförmige Raster des Führungsstrahles wird dazu benutzt, die Ausgangsspannungen der drei Farbkanäle zu steuern, damit der Schreibstrahl, abhängig von seiner Lage auf den Leuchtschichtstreifen, mit den jeweils richtigen Farbspannungen moduliert werden kann. Damit diese Steuerung nur vom Führungsstrahl selbst vorgenommen wird, ist dieser zusätzlich mit einer weit über der Video-Bandgrenze liegenden Frequenz moduliert (40—50 MHz). Durch anschließendes selektives Ausfiltern kann also die vom hochfrequent modulierten Führungsstrahl herrührende Rasterfolge von der vom Schreibstrahl erzeugten Sekundär-Emission getrennt werden.

Eine weitere Abwandlung dieser Farbsteuerung besteht darin, daß auf der Aluminiumverspiegelung Indexstreifen benutzt werden, die beim Auftreffen der Elektronen ultraviolette Strahlen aussenden. Über eine entsprechend fotoempfindliche Zelle kann dann diese ultraviolette Strahlung zur nachfolgenden Farbsteuerung herangezogen werden.

4. *„Banana-Tube“*

In den letzten Jahren ist eine Farbbildröhre unter der Bezeichnung „Banana-Tube“ bekanntgeworden. Diese Röhre besitzt gleichfalls nur eine Elektronenkanone und ist in ihren elektrischen Abmessungen sehr klein gehalten, da sie, ohne elektrische Vertikal-Ablenkung, nur in der horizontalen Ablenkrichtung ein Bild erzeugt.

Die vertikale Ablenkung wird optisch durch Projektion auf einen Hyper-

bolspiegel vorgenommen. Dies geschieht über Zylinderlinsen, die axial an einer Trommel sitzen, welche um die „Banana-Tube" rotiert.

Die Abb. VIII. 1. 5. (S. 116) gibt das Grundprinzip wieder. In einem röhrenförmigen Glaskolben sind vier horizontale Leuchtschichtstreifen in den Farben Rot, Grün, Blau und Weiß angeordnet. Der Elektronenstrahl der Elektronenkanone wird von einer Ablenkspule waagerecht in Richtung über diese Streifen geführt. Damit der Auftreffwinkel des Elektronenstrahles am Zeilenende und damit der Strahldurchmesser auf der Leuchtschicht gleich bleibt, wird von einem Dauermagneten mit entsprechend ausgebildeten Polschuhen ein zusätzliches Magnetfeld erzeugt, das zusammen mit dem Ablenkfeld diesen Auftreffwinkel konstant hält.

Um mit dem Elektronenstrahl alle drei Farbstreifen überstreichen zu können, wird eine sinusförmige Strahlwobbelung vorgenommen. Abhängig von dieser Strahlwobbelung werden gleichzeitig die Ausgangsspannungen der Farbsignalverstärker gesteuert. Für die Schwarz/Weiß-Wiedergabe wird der vierte getrennte weiße Leuchtschichtstreifen herangezogen.

Ein schwieriges mechanisches Problem stellt bei dieser Röhre die rotierende Trommel mit den axial angeordneten Zylinderlinsen dar, da sie um die „Banana-Tube" mit der Vertikalfrequenz rotieren muß, um auf den Hyperbolspiegel optisch das komplette Bildraster zu erzeugen.

VIII. 2. Aufbau der Lochmaskenröhre

Trotz der vielen Möglichkeiten unterschiedlicher Farbsteuerungssysteme einschließlich der erprobten verschiedenartigen Varianten konnten alle im vorigen Abschnitt beschriebenen Farbbildröhren bisher das Laborstadium nicht überwinden und sich für eine Massenfabrikation durchsetzen. Die einzige Farbbildröhre, die in größeren Stückzahlen als Massenfabrikation gefertigt wird, ist die Lochmaskenröhre. Diese Lochmasken-Farbbildröhre braucht kein zusätzliches, getrenntes Farbsteuerungssystem, da sie drei Elektronenkanonen besitzt, wobei für jede Elektronenkanone entsprechend angeordnete Leuchtstoffpunkte in der jeweiligen Primärfarbe auf dem Bildschirm vorhanden sind. Das technische Problem dieser Farbbildröhre liegt also nicht in der exakten Farbsteuerung, sondern stellt ein Deckungsproblem der drei Elektronensysteme dar. Die Farbwiedergabe aller drei Primärfarben erfolgt in diesem Röhrentyp gleichzeitig, so daß ein Simultanprinzip, genauso wie bei der HF-Übertragung des Farbsignals, vorliegt. Der elektrische Aufbau dieser Lochmasken-Farbbildröhre sieht so aus, daß im Bildröhrenhals drei Elektronenkanonen, jeweils um 120° gegeneinander versetzt, symmetrisch zur Bildröhrenachse angeordnet sind.

Jede dieser drei Elektronenkanonen besitzt eine Katode, ein Steuergitter,

ein Schirmgitter, eine Fokussieranode und die Anode für die Hochspannung, sowie ein Polschuhpaar, mit dem die Regelung und Einstellung der Strahldeckung möglich ist. Getrennt herangeführt und einstellbar sind hierbei die Katoden-, Steuer- und Schirmgitteranschlüsse, während die Fokussieranode und die Hochspannungsanode gemeinsam am gleichen Potential liegen.

In Abb. VIII. 2. 1. ist dieser Aufbau angedeutet.

Die Leuchtstoffschicht baut sich aus einzelnen Farbtripeln auf. Diese Farbtripel bestehen aus je einem Leuchtstoffpunkt der Primärfarben Rot, Grün und Blau, die in Form eines gleichseitigen Dreiecks angeordnet sind. Die bisher gebräuchlichen Lochmasken-Farbbildröhren haben 21″-Durchmesser und 70°-Ablenkwinkel, wobei der Bildschirm aus je ca. 400 000 roten, grünen und blauen Leuchtstoffpunkten besteht.

Ca. 15 mm vor dieser Leuchtstoffschicht befindet sich die sogenannte Lochmaske. Sie besteht aus einer sehr dünnen Metallfolie von ca. 0,2 mm Stärke und enthält genau so viele Löcher wie Farbtripel auf dem Bildschirm angeordnet sind. Die Löcher der Lochmaske liegen jeweils genau im Dreiecksmittelpunkt eines Farbtripels. Bei der 21″-Röhre beträgt der

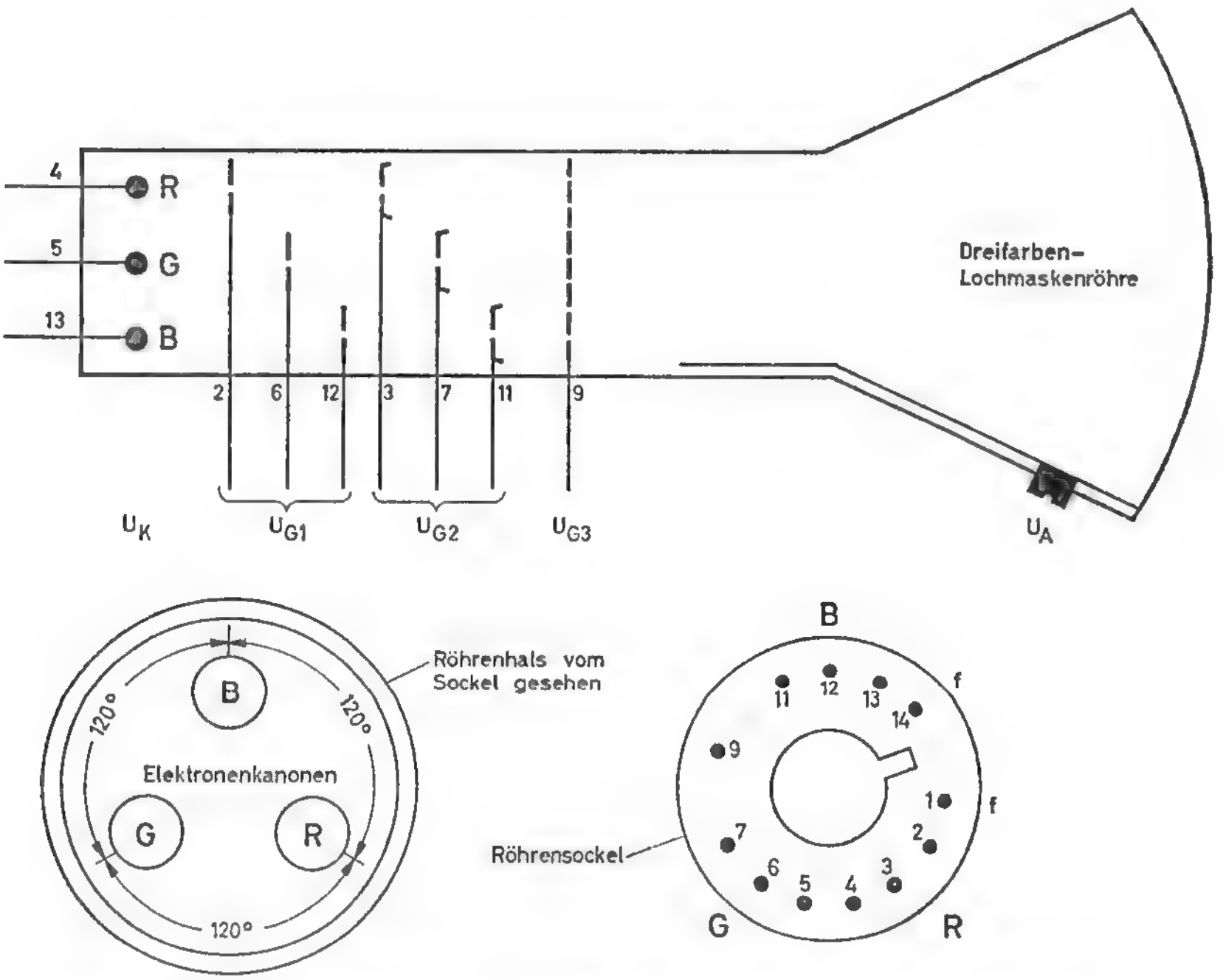


Abb. VIII. 2. 1. Elektrischer Aufbau der Dreifarben-Lochmaskenröhre.

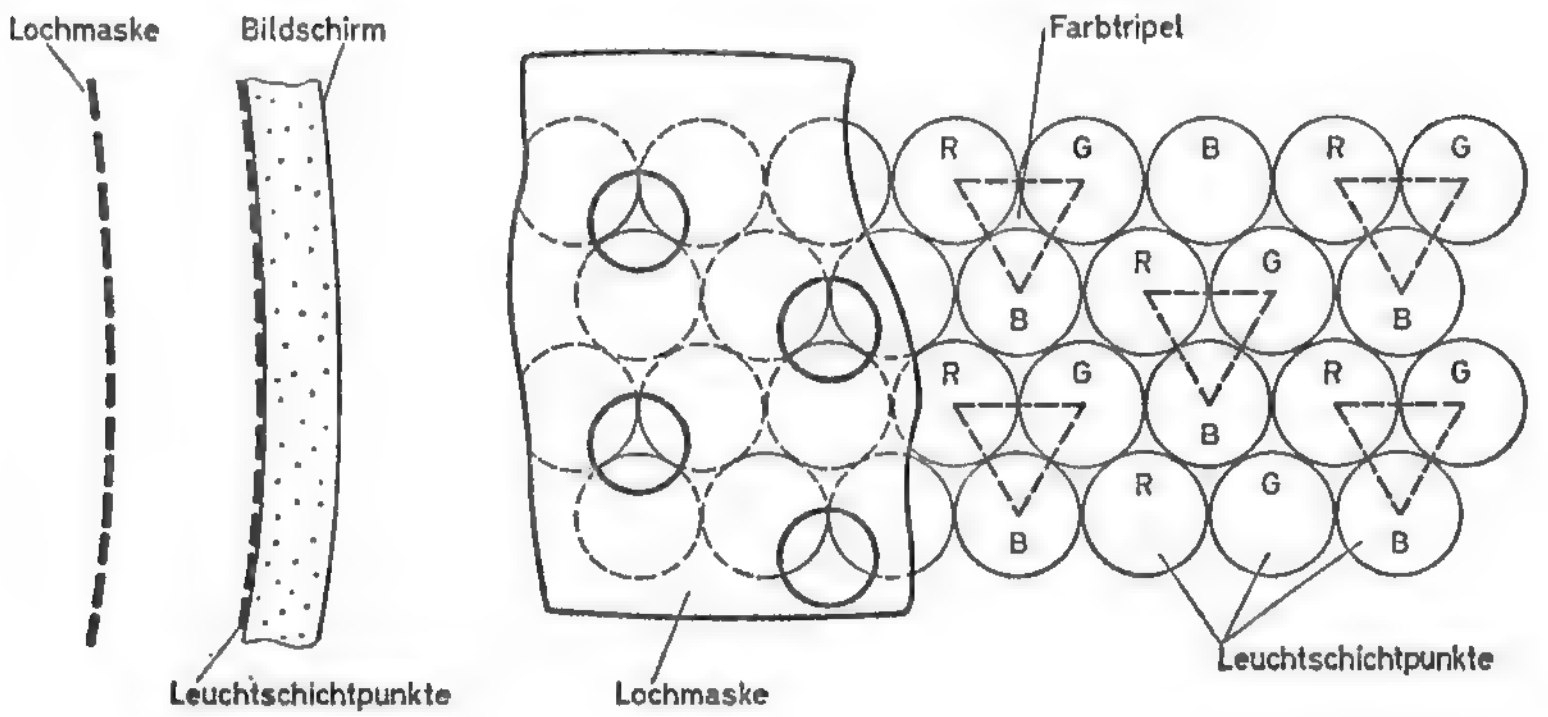


Abb. VIII. 2. 2. Relative Lage der Lochmaske zu den Farbtripeln.

Durchmesser der Löcher etwa 0,25 mm, und der gegenseitige Abstand ca. 0,6 mm. Die relative Lage der Lochmaske zu den Farbtripeln ist in Abb. VIII. 2. 2. dargestellt.

Da die Elektronenstrahlen die gesamte Lochmaske überstreichen und

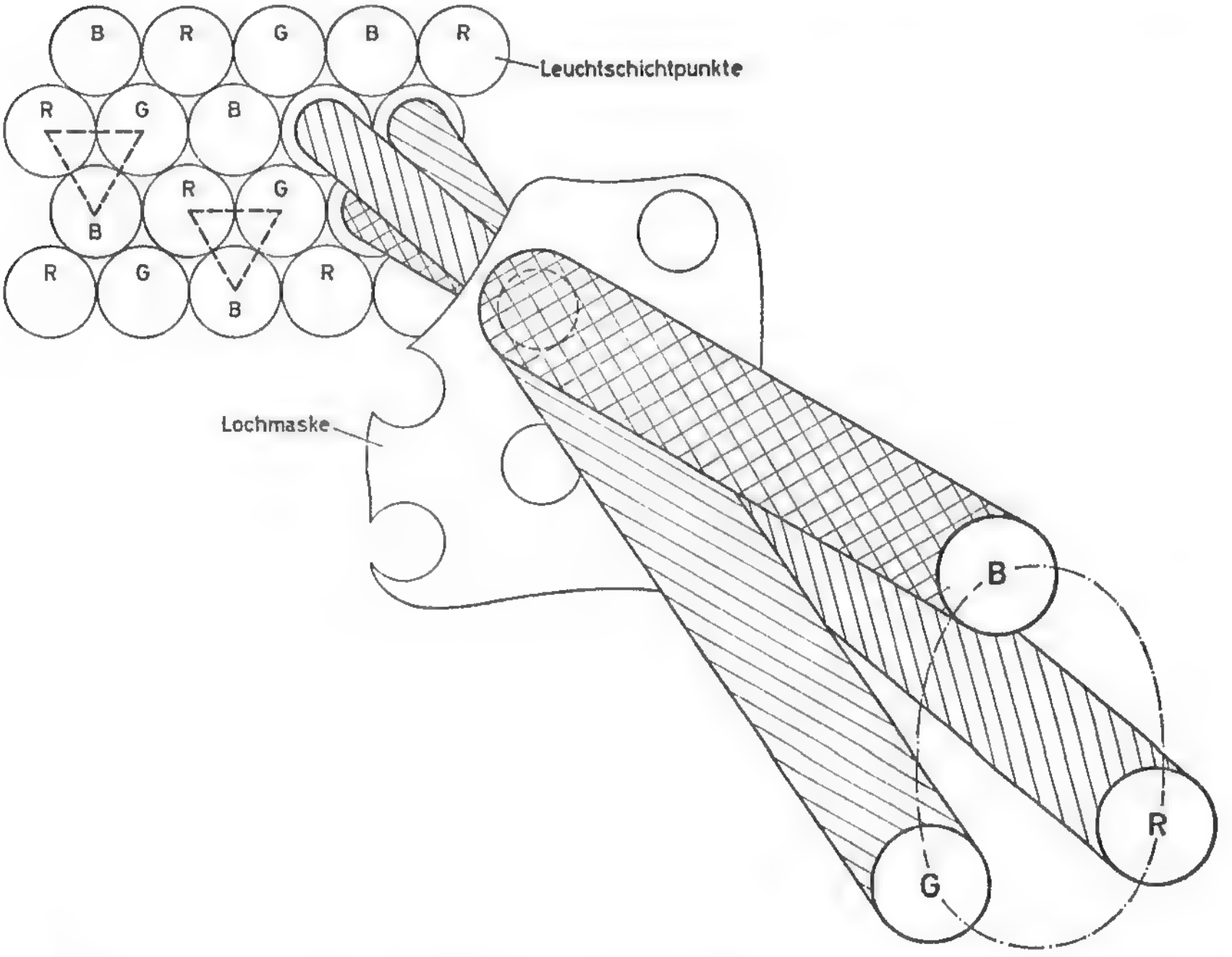


Abb. VIII. 2. 3. Zuordnung der drei Elektronenstrahlen zu den Leuchtschichtpunkten durch die Anordnung der Lochmaske.

nur die Elektronen, die durch die Löcher hindurchtreten, einen Farbpunkt treffen, werden ca. 80% der Elektronen von dieser Lochmaske aufgefangen, so daß nur etwa 20% des Elektronenstrahles zum Anregen der Leuchtstoffpunkte ausgenutzt werden kann. Bei einer Hochspannung von 25 kV und einem Gesamtstrahlstrom aller drei Kanonen von ca. 1 mA bedeutet dies, daß auf der Lochmaske ca. 20 Watt Hochspannungsleistung in Wärme umgesetzt wird. Die Lochblende wird also im Betrieb sehr heiß und es muß durch spezielle Montagevorrichtungen dafür gesorgt werden, daß trotz dieser Erwärmung im Betrieb keine unzulässigen Verschiebungen und Lageveränderungen der Lochmaske relativ zum Bildschirm erfolgen. Die drei im Bildröhrenhals angeordneten Elektronenkanonen sind so gegen die Bildröhrenachse geneigt, daß ihre Elektronenstrahlen sich in der Ebene der Lochmaske treffen und nach dem Auseinanderlaufen der drei Strahlen nach dem Durchgang durch die Lochmaske trifft jeder Strahl nur immer den ihm zugehörigen Farbpunkt. Betrachtet man nur jeweils einen Elektronenstrahl, so trifft dieser über den gesamten Bildschirm, unabhängig von seiner jeweiligen Lage, den hinter der Lochmaske befindlichen Farbpunkt, der für diese Elektronenkanone maßgebend ist. Stark vergrößert ist diese Strahlneigung und Überschneidung in der Ebene der Lochmaske in Abb. VIII. 2. 3. eingezeichnet.

Der Durchmesser des fokussierten Elektronenstrahls ist dabei größer als die Löcher der Lochmaske, damit unabhängig von der Ablenkrichtung immer Löcher in der Lochmaske getroffen werden und ein komplettes Bildraster ausgeschrieben wird.

Unter der Voraussetzung, daß sich die drei Elektronenstrahlen in der Ebene der Lochmaske überschneiden, ist automatisch eine 100%-ige Deckung gewährleistet, wenn bei der Bildröhrenfertigung die Lochmaske so angeordnet ist, daß ihre Löcher jeweils im Zentrum eines Farbtripels sitzen und unter dem Eintreffwinkel der drei Elektronenstrahlen die Farbpunkte Rot, Grün und Blau angeordnet sind. Das Zusammentreffen aller drei Elektronenstrahlen in der Ebene der Lochmaske muß durch zusätzliche Einstellhilfen an der Bildröhre sichergestellt werden. Hierzu besitzt jede Elektronenkanone ein Polschuhpaar. Das Magnetfeld für dieses Polschuhpaar wird von einer Spuleneinheit am Bildröhrenhals erzeugt. Die Überschneidung der drei Elektronenstrahlen in der Ebene der Lochmaske wird als Konvergenz bezeichnet. Analog hierzu nennt man die Spuleneinheit, die die Magnetfelder für die Regelung dieser Konvergenz erzeugt, die Konvergenzspuleneinheit.

In den Abschnitten VIII. 4. und VIII. 5. werden wir sehen, daß zwei grundsätzliche Einstellvorgänge für diese Konvergenzregelung durchge-

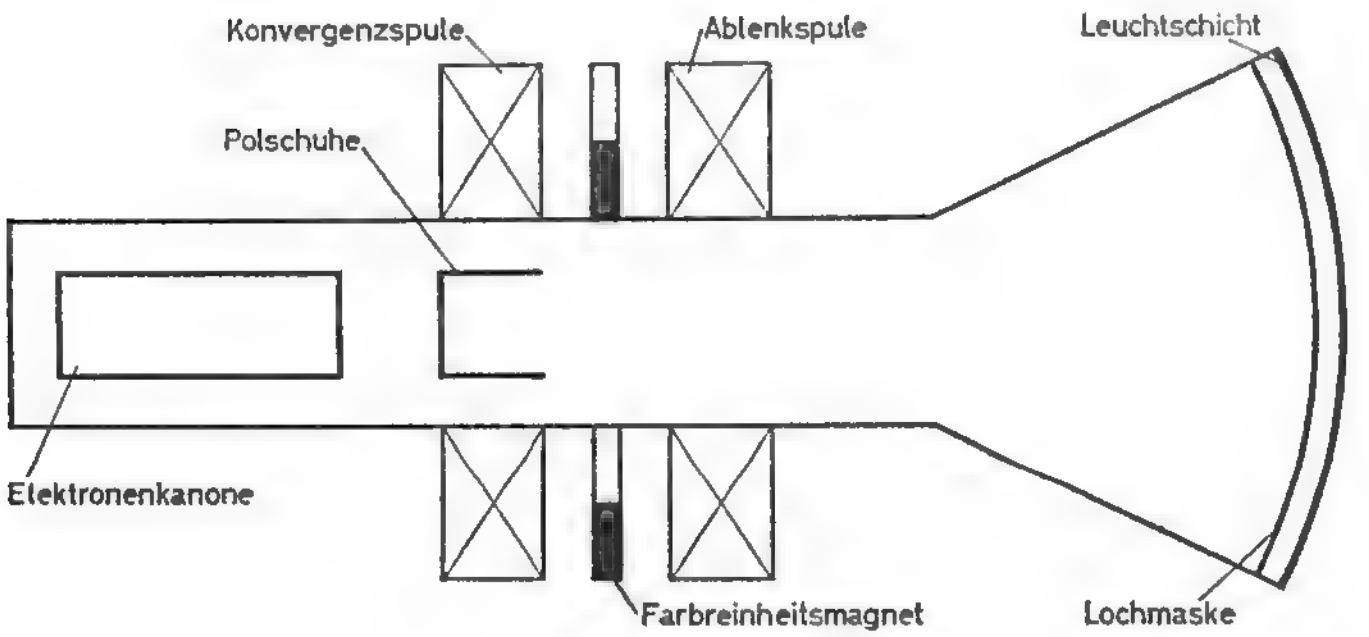


Abb. VIII. 2. 4. Dreifarben-Lochmaskenröhre mit Ablenkeinheit und Konvergenzspule.

führt werden müssen. Es ist dies einmal die statische Konvergenz, praktisch die Grundeinstellung in der Bildschirmmitte, für die man meistens eine Regelung durch Verändern von Magnetkernen vorsieht. Die zweite dynamische Konvergenzregelung dient zur Kompensation der Abbildungsfehler, die durch die Anordnung der Elektronenkanonen versetzt zur Bildröhrenachse und durch die Benutzung eines flachen Bildröhrenschirmes bedingt sind. Der Gesamtaufbau der Dreifarben-Lochmaskenröhre ist in Abb. VIII. 2. 4. schematisch dargestellt.

Vor der Konvergenzspuleneinheit sitzen noch zwei drehbar angeordnete magnetisierte Bleche, mit denen die Lage aller drei Elektronenstrahlen auf dem Bildschirm verschoben werden kann, wodurch der richtige Auftreffwinkel und ein maximaler Durchtritt von Elektronen durch die Löcher der Lochmaske sichergestellt wird, so daß diese magnetisierten Bleche als Farbreinheitsmagnet bezeichnet werden. Danach folgt die eigentliche Ablenkeinheit, die alle drei Elektronenstrahlen gleichmäßig auslenkt. Die Ablenkeinheit ist genauso aufgebaut wie eine Schwarz/Weiß-Ablenkeinheit, nur mit dem Unterschied, daß sie wesentlich umfangreicher ist und mehr Ablenkenergie benötigt, weil der Durchmesser des Röhrenhalses gegenüber der Schwarz/Weiß-Bildröhre größer ist.

VIII. 3. Einstellung an der Lochmaskenröhre

Die Gleichspannungspotentiale der drei Elektronenkanonen entsprechen in ihren Werten einer normalen Schwarz/Weiß-Bildröhre mit dem einzigen Unterschied, daß die Spannungen für die Fokussierungsanode und die Hochspannung mit 5 bzw. 25 kV entsprechend höher liegen. Die Ansteuerung mit dem Video-Signal erfolgt meistens direkt von der Anode der Video-Endröhre an der Katode der Bildröhre. Damit liegen die drei

Katoden der Lochmaskenröhre auf einem Gleichspannungspotential von ca. 150 Volt. Am Gitter 1 müssen damit für die normale Helligkeitseinstellung etwa 80 Volt herrschen. Die Gitter 2-Spannung beträgt ca. 400 Volt.

In der Abb. VIII. 3. 1. sind die mittleren Spannungspotentiale eingezeichnet und die einstelbaren Werte mit ihren Potentiometern angegeben. Sowohl die Gitter 1- als auch die Gitter 2-Spannung kann für jede der drei Elektronenkanonen getrennt eingestellt werden. Dies ist erforderlich, damit die Anodenstromcharakteristiken der drei Kanonen in allen Punkten der Kennlinie übereinstimmen. Die Grundeinstellung ist hierbei so vorzunehmen, daß sowohl für alle drei Kanonen der Anodenstromkniepunkt, also der Sperrwert für den Anodenstrom, als auch der maximale Anodenstrom bei optimaler Intensität gleich ist. Mit den Gitter 1- und Gitter 2-Spannungen kann also die wiedergegebene Farbintensität so eingestellt werden, daß alle drei Primärfarbanteile zueinander im richtigen Intensitätsverhältnis stehen, damit z.B. bei gleichzeitiger Anwesenheit aller drei Farben sich die richtige Ermischung von Weiß ergibt.

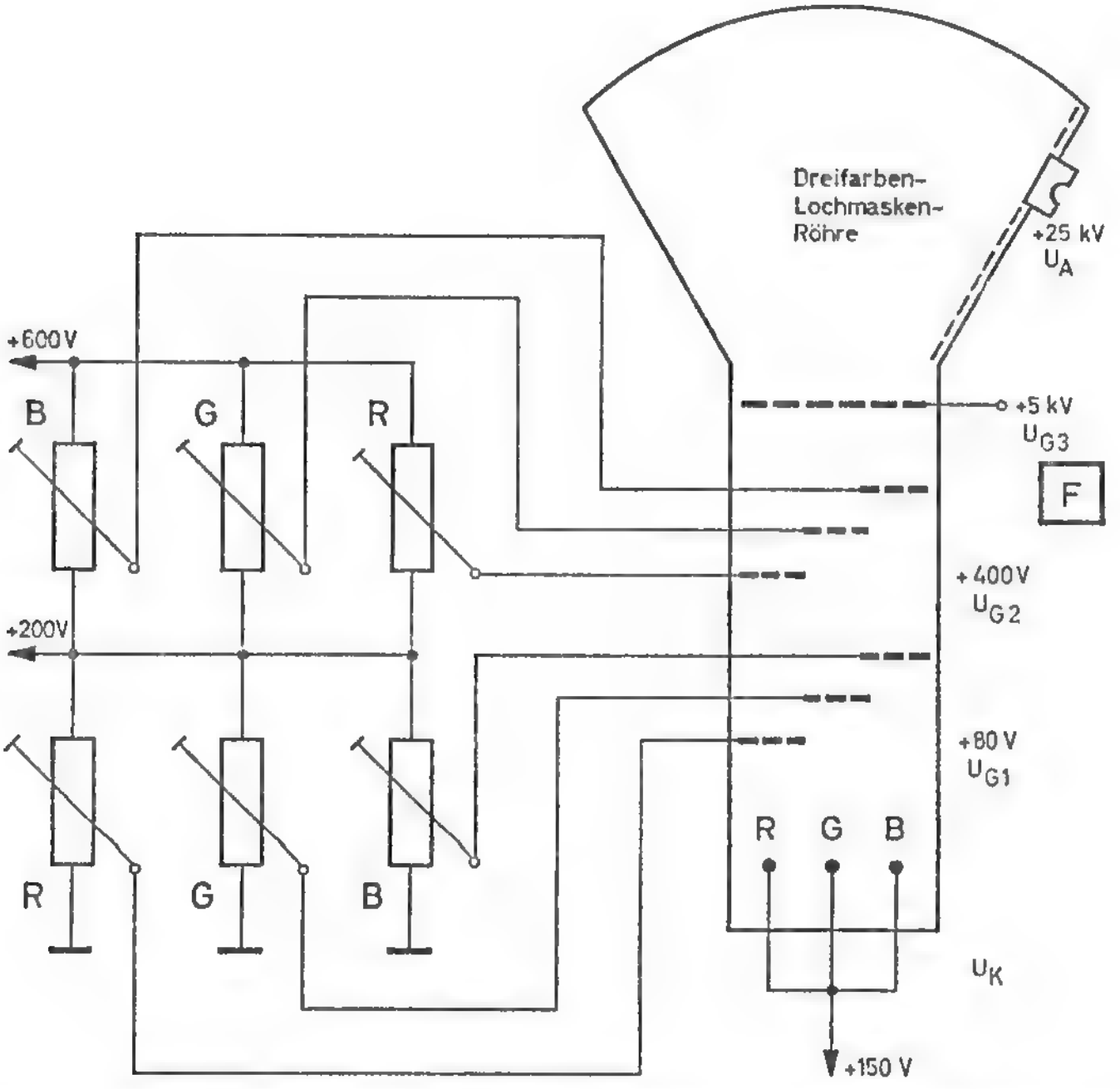


Abb. VIII. 3. 1. Gleichspannungspotentiale an der Dreifarben-Lochmasken-Röhre.

Dies muß auch immer dann der Fall sein, wenn der Farbempfänger aufgrund seiner Kompatibilität ein Schwarz/Weiß-Signal wiedergeben muß. Wichtig ist bei dieser Bildröhreneinstellung, daß die richtigen Farbintensitäten der drei Kanonen im gesamten Regelbereich der Helligkeit bzw. des Kontrastes erhalten bleiben.

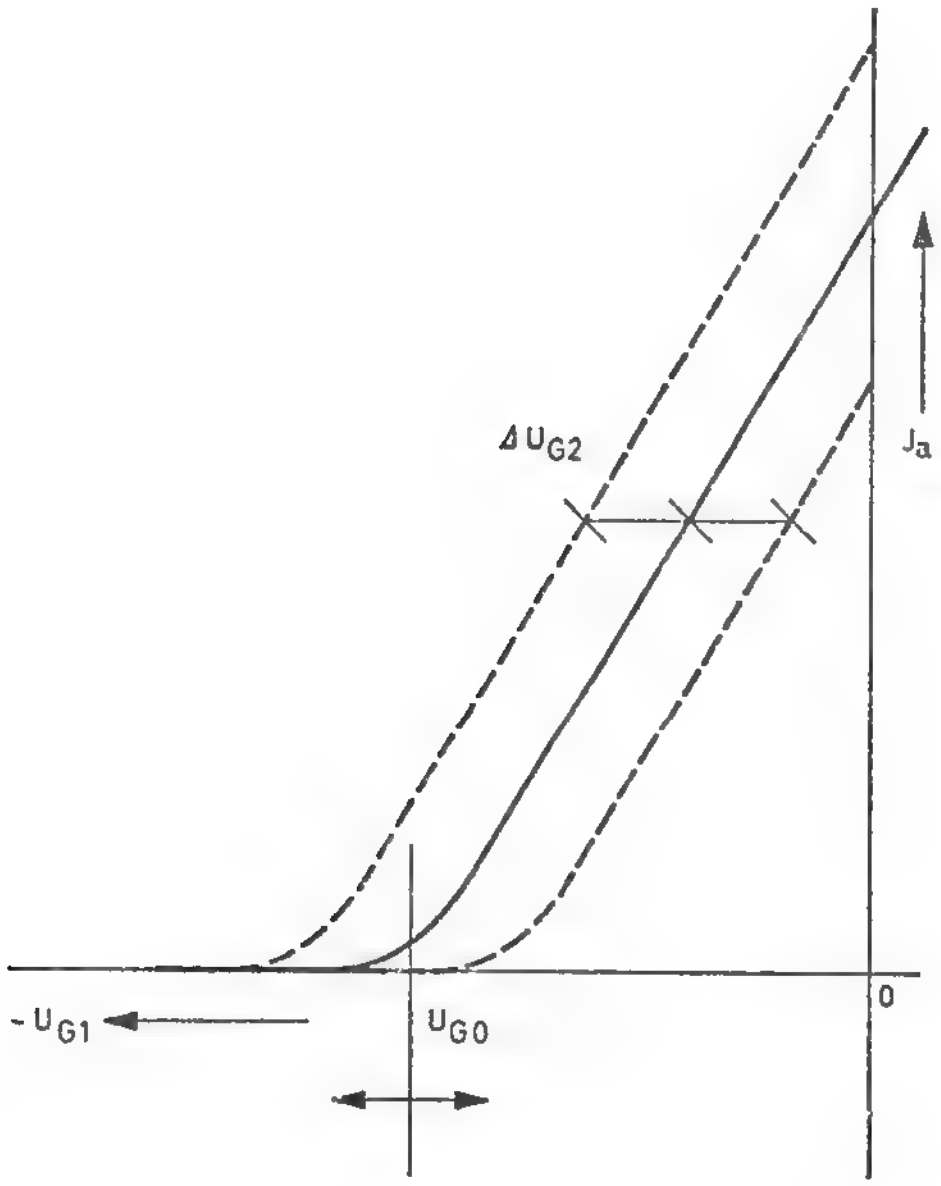


Abb. VIII. 3. 2. Arbeitspunkteinstellung durch U_{G1}- und U_{G2}-Spannungen.

Wie in Abb. VIII. 3. 2. angedeutet, wird mit der Gitter 2-Spannung die Anodenstrom-Gitterspannungs-Kennlinie, wie bei jeder Pentode, parallel verschoben. Es kann also bei gegebener Gittervorspannung bei einer bestimmten Aussteuerung die Höhe des maximalen Anodenstromes festgelegt werden. Durch die Gitter 1-Spannung wird dann der eigentliche Arbeitspunkt im unteren Kennlinienknick definiert.

Neben diesen Gleichspannungswerten wird die Dreifarbenbildröhre sowohl an der Katode als auch am Gitter 1 mit einer Wechselspannung angesteuert. Die Katodenansteuerspannung besteht dabei aus dem Leuchtdichtesignal — U_Y und am Gitter 1 liegen die drei Farbdifferenzsignale $U_B - U_Y$, $U_G - U_Y$ und $U_R - U_Y$. Dies ist nochmals in Abb. VIII. 3. 3. dargestellt.

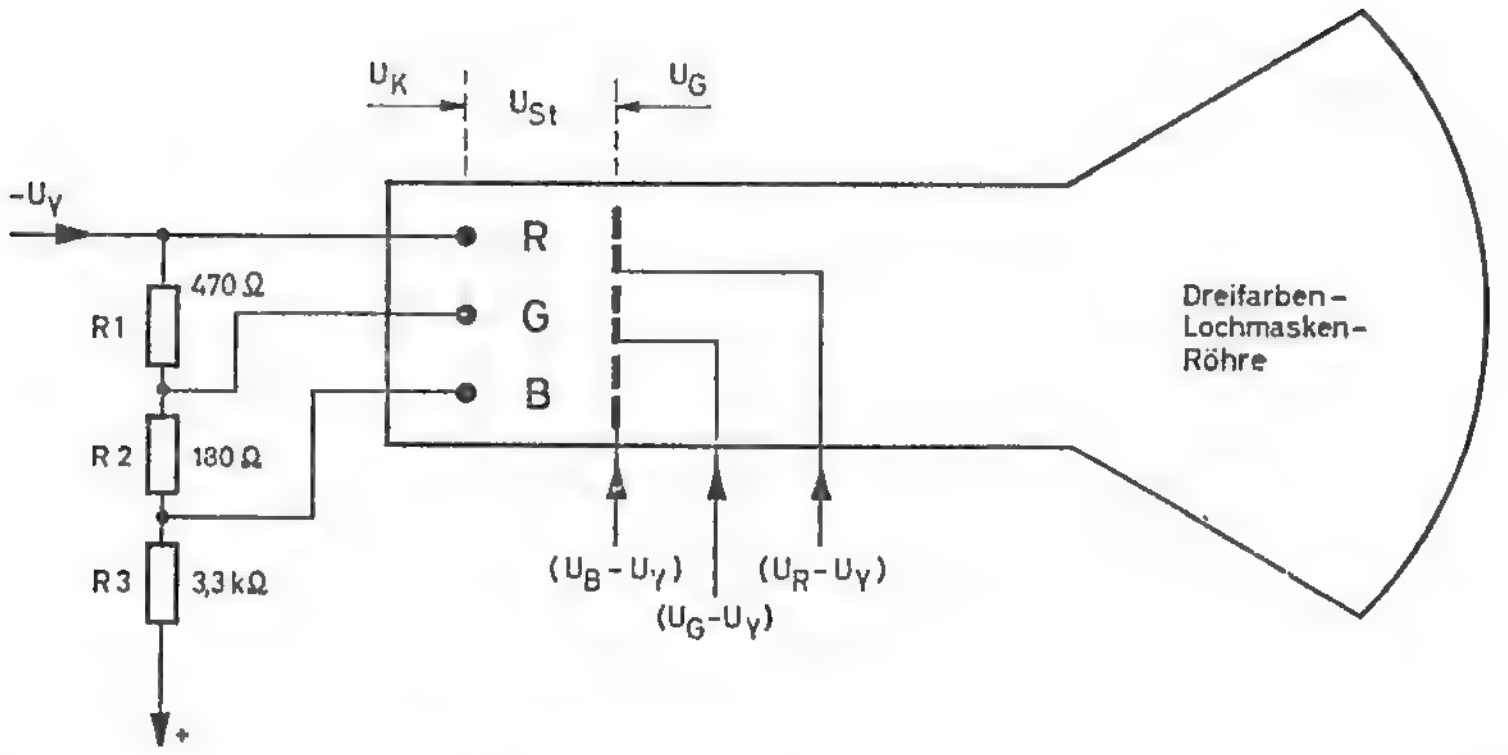


Abb. VIII. 3. 3. Steuerspannungen für die Primärfarbanteile einer Dreifarben-Lochmasken-Röhre.

Als effektive Steuerspannung wird damit die Differenz zwischen der Katodenspannung U_K und der Gitterspannung U_G wirksam. Für die rote Kanone ergibt dies: $U_{ST} = (U_R - U_Y) - (- U_Y) = U_R$. In ähnlicher Weise ergibt sich für die grüne und blaue Kanone die Steuerspannung U_G bzw. U_B. Diese Steuerspannung für die drei Elektronenkanonen besitzt also die gleiche Gestalt wie die drei Primärfarbspannungen am Ausgang der drei Aufnahmeröhren der Farbkamera beim Sender. In der nachfolgenden Tabelle ist zusammengestellt, welche Steuerspannungen an den drei Katoden bzw. den drei Steuergittern auftreten, wenn vom Sender ein rotes bzw. grünes oder blaues Farbsignal ausgestrahlt wird.

Bildsignal des Senders		Katode $-U_Y$	Gitter U_G	Steuerspannung U_{ST}
			$(U_R - U_Y)$ + 0,70	1,00 R
Rot	1,00	— 0,30	$(U_G - U_Y)$ — 0,30	0 G
			$(U_B - U_Y)$ — 0,30	0 B
			$(U_R - U_Y)$ — 0,59	0 R
Grün	1,00	— 0,59	$(U_G - U_Y)$ + 0,41	1,00 G
			$(U_B - U_Y)$ — 0,59	0 B
			$(U_R - U_Y)$ — 0,11	0 R
Blau	1,00	— 0,11	$(U_G - U_Y)$ — 0,11	0 G
			$(U_B - U_Y)$ + 0,89	1,00 B

Die vereinfachte Darstellung der Ansteuerung der Dreifarbenbildröhre, bei der alle drei Katoden parallel verbunden sind und an denen das Leucht-

dichtesignal U_Y liegt, gilt nur, wenn die Leuchtstoffpunkte der Farbbildröhre die gleiche Intensität aufweisen. In der Praxis müssen jedoch die zwischen den Leuchtstoffen für die drei Primärfarben bestehenden Intensitätsunterschiede berücksichtigt werden. Die heutigen modernen Lochmasken-Farbbildröhren besitzen als Leuchtschichtpunkte Sulfidleuchtstoffe, während die älteren Röhren Phosphorleuchtstoffe besaßen. Die relativen Intensitätsverhältnisse der Sulfidleuchtstoffe verhalten sich von Blau zu Grün zu Rot wie 1 : 0,88 : 0,835. Bei den Phosphorleuchtstoffen ist dieser relative Unterschied wesentlich größer und beträgt z.B. 1 : 0,62 : 0,52. Diese relativen Intensitätsunterschiede müssen selbstverständlich in den Ansteuerspannungen amplitudenmäßig berücksichtigt werden. Für das Leuchtdichtesignal bedeutet dies, daß den drei Katoden die Leuchtdichtespannung über einen aufgeteilten Arbeitswiderstand im Verhältnis 1 : 0,88 : 0,835 zugeführt werden muß. Dies ist in Abb. VIII. 3. 3. mit den drei Katodenwiderständen $R\,1$, $R\,2$ und $R\,3$ eingetragen. Da der rote Leuchtstoff die geringste Intensität aufweist, muß er die größte Video-Ansteuerspannung erhalten. Bei einer Widerstandsgröße von ca. 4 kΩ für eine normale Video-Endröhre könnten z.B. für die drei Widerstände folgende Größen verwendet werden: $R\,3 = 3{,}3$ kΩ, $R\,2 = 180\ \Omega$ und $R\,1 = 470\ \Omega$. Im gleichen relativen Verhältnis zueinander muß sich auch die Ansteuerspannung der Farbdifferenzsignale für die drei Steuergitter verhalten.

VIII. 4. Statische Konvergenz

Die Elektronenstrahlen der drei getrennten Elektronenkanonen müssen so gesteuert werden, daß sie sich in der Ebene der Lochmaske in einem Punkt überschneiden. Dies ist erforderlich, damit jeder der drei Elektronenstrahlen nach dem Durchtritt durch die Löcher der Lochmaske seinen ihm zugehörigen Farbpunkt der Leuchtstoffschicht trifft. Diese Steuerung und Einstellung kann mit zusätzlichen Magnetfeldern vorgenommen werden, welche von der Konvergenzeinheit am Bildröhrenhals erzeugt werden. Wird diese Einstellung richtig vorgenommen, so kann auf dem gesamten Bildschirm z.B. der Elektronenstrahl der roten Kanone nur die roten Leuchtstoffpunkte, der Elektronenstrahl der grünen Kanone nur die grünen Leuchtstoffpunkte und der Elektronenstrahl der blauen Kanone nur die blauen Leuchtstoffpunkte eines zusammengehörigen Farbtripels treffen. Dies ist in Abb. VIII. 4. 1. (S. 133) angedeutet.

Es sind jeweils drei getrennte Ausschnitte der Lochmaske für die Blickrichtung von der roten, grünen und blauen Elektronenkanone eingezeichnet. Von der roten Kanone z.B. in Richtung zur Lochmaske gesehen, kann durch die Öffnung der Löcher in der Lochmaske nur als

Leuchtstoffpunkte der rote Leuchtstoff getroffen werden. Dies gilt für den gesamten Bildschirm, unabhängig von der jeweiligen Lage des Elektronenstrahles. Zentral zur Röhrenachse gesehen, liegen dabei die Löcher in der Lochmaske so, daß sie mit dem Mittelpunkt eines jeweiligen Farbtripels, bestehend aus einem roten, grünen und blauen Leuchtstoffpunkt, zusammenfallen.

Daß durch die Öffnung der Lochmaske von jeder Elektronenkanone nur die entsprechend zugeordneten Farbpunkte der Leuchtstoffschicht getroffen werden können, ist durch die räumliche Anordnung der drei Elektronenkanonen sichergestellt. Diese sind nämlich neben ihrer radialen Verschiebung um 120° auch noch gegen die Röhrenachse selbst geneigt. Diese Neigung zur Röhrenachse beträgt ca. 1,5°. Stark übertrieben eingezeichnet ist diese Neigung zur Bildröhrenachse in Abb. VIII. 4. 2.

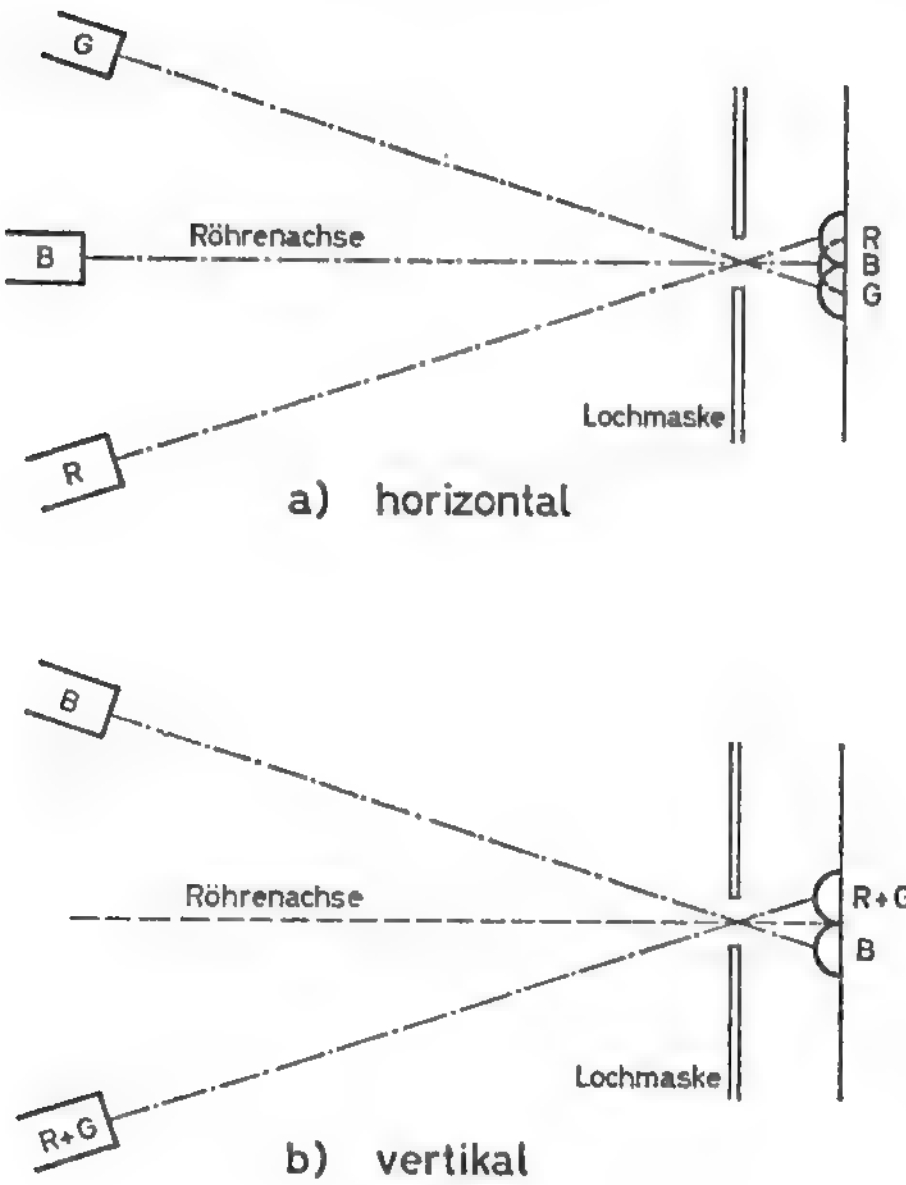


Abb. VIII. 4. 2. Neigung der Elektronenkanonen gegen die Röhrenachse. a) horizontal, b) vertikal

In horizontaler Richtung liegt dabei die blaue Kanone genau oberhalb der Röhrenachse, während die grüne und rote Kanone schräg zur Achse geneigt sind. In vertikaler Richtung ist für alle drei Kanonen eine Neigung zur Bildröhrenachse vorhanden. Die drei Elektronenstrahlen werden also unter dieser Neigung sich an einem bestimmten Punkt auf der Röhrenachse überschneiden. Dieser Überschneidungspunkt, an dem die drei Strahlen

zur Deckung kommen, wird als Konvergenzpunkt bezeichnet. Liegt dieser Konvergenzpunkt genau in der Ebene der Lochmaske, so treffen die drei Elektronenstrahlen nach dem Durchgang durch die Löcher jeweils die zusammengehörigen Farbpunkte eines Farbtripels. Es muß jetzt für die gesamte Lochmaske sichergestellt werden, daß die drei Elektronenstrahlen überall zur Deckung kommen. Die hierfür notwendige Steuerung der Elektronenstrahlen muß für jeden Strahl getrennt beeinflußbar sein. Als Bewegungsrichtung wählt man dabei, um 120° gegeneinander versetzt, eine Linie, die von der Kanone zur Röhrenachse läuft.

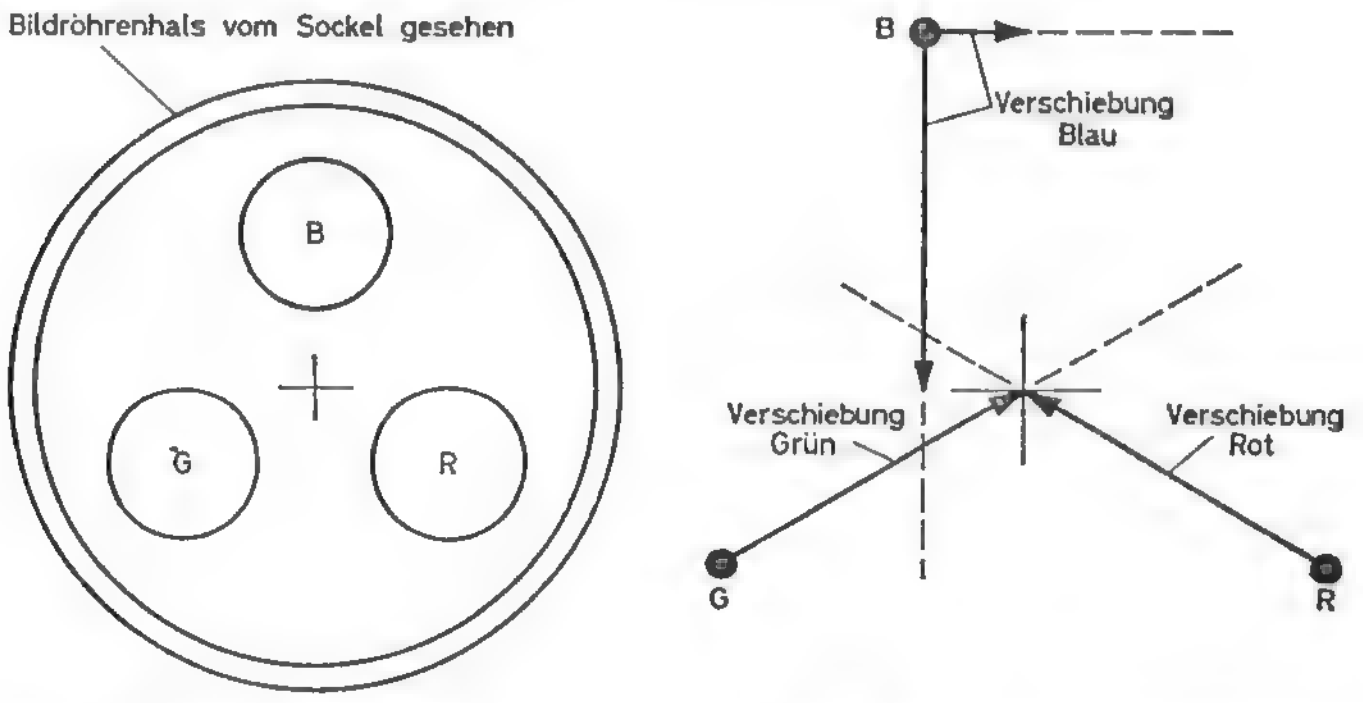


Abb. VIII. 4. 3. Bewegungsrichtungen der drei Elektronenstrahlen für die statische Konvergenz.

In Abb. VIII. 4. 3. sind diese erforderlichen Bewegungsrichtungen für die drei Elektronenkanonen eingezeichnet. Die exakte Deckung der drei Elektronenstrahlen erfordert vier verschiedene Bewegungsrichtungen. Für den grünen und roten Elektronenstrahl gibt es einen Schnittpunkt in den Bewegungsrichtungen von 120° gegen die Röhrenachse versetzt. Um diesen Schnittpunkt mit dem blauen Elektronenstrahl erreichen zu können, ist, wenn nicht zufällig die blaue Elektronenkanone genau über diesen Schnittpunkt liegt, sowohl eine senkrechte als auch eine waagerechte Bewegungskomponente erforderlich.

Die praktische Ausführung dieser Elektronenstrahlbewegungen ist am einfachsten mit einem regelbaren Magnetfeld durchführbar, da jeder Elektronenstrahl in seiner Stromrichtung ein kreisförmiges Magnetfeld besitzt. Wird dieser Elektronenstrahl durch ein homogenes Magnetfeld, wie es in Abb. VIII. 4. 4. angedeutet ist, geschickt, so findet je nach Flußrichtung des Magnetfeldes auf der einen Seite eine Verstärkung der magnetischen Kraft-

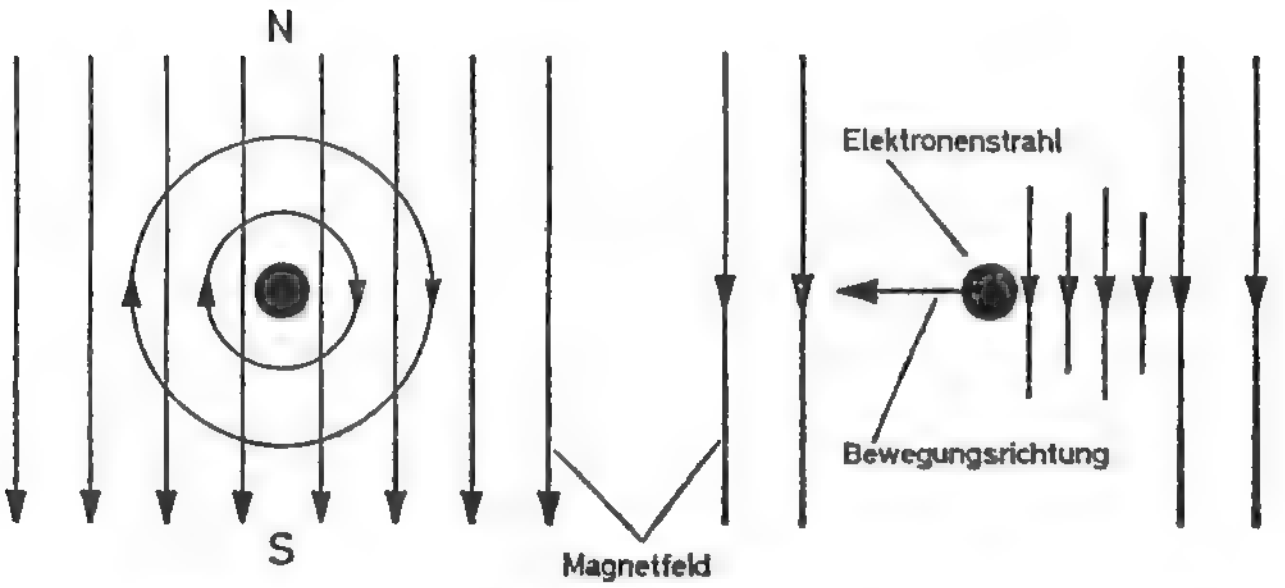


Abb. VIII. 4. 4. Auslenkung eines Elektronenstrahles durch Magnetfelder.

linien und auf der anderen Seite eine Schwächung bzw. teilweise Aufhebung der magnetischen Kraftlinien statt. Durch diese ungleichmäßige Kraftliniendichte wird auf den Elektronenstrahl eine einseitig gerichtete Kraft ausgeübt. Der Elektronenstrahl wird also senkrecht zu den magnetischen Kraftlinien ausgelenkt. Für die Erzeugung dieser Kraftlinien dienen in der Dreifarben-Lochmaskenröhre die inneren Polschuhpaare hinter den drei Elektronenkanonen.

Diese inneren Polschuhe und die äußere Konvergenzeinheit sind schematisiert in Abb. VIII. 4. 5. dargestellt.

Am Bildröhrenhals oberhalb der inneren Polschuhe sitzt ein Magnetkern mit einer Spulenwicklung. Durch Regelung des Stromes durch diese Spulen-

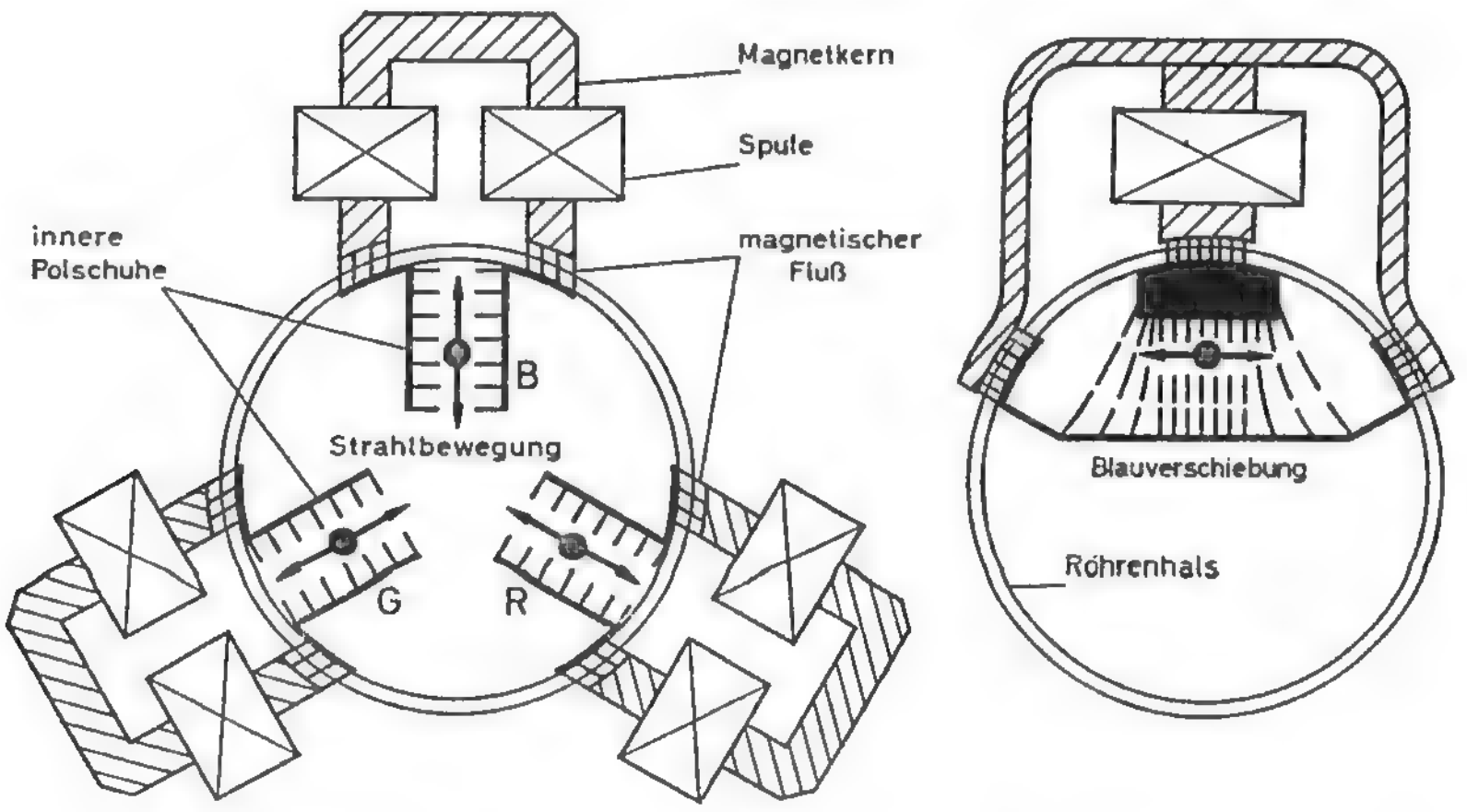


Abb. VIII. 4. 5. Bewegungsänderungen der drei Elektronenstrahlen durch Regelung des magnetischen Flusses über äußere Magnete und innere Polschuhe.

wicklung oder durch Lageveränderung eines Dauermagneten wird der magnetische Fluß zwischen den inneren Polschuhen beeinflusst und damit die Auslenkung des Elektronenstrahles senkrecht zum magnetischen Fluß bewirkt. Für die blaue Elektronenkanone ist darüberhinaus ein zweiter Magnetkern mit einem weiteren inneren Polschuh derart angeordnet, daß auch noch eine waagerechte Strahlbewegung ausgeführt werden kann, so daß alle vier Bewegungsrichtungen einstellbar sind. Die Regelung kann mit verschiebbaren Dauermagnetkernen oder aber mit einem einstellbaren Gleichstrom durch die Konvergenzspulen vorgenommen werden. Unabhängig von der Art dieser Regelung muß über den magnetischen Fluß der Konvergenzpunkt für alle drei Elektronenstrahlen in die Ebene der Lochmaske gelegt werden. Diese Konvergenzeinstellung ist jedoch nur exakt auf einem Kreisbogen, bezogen auf den Ablenkmittelpunkt, durchführbar. Bei einem flachen Bildschirm trifft dies nur für die Bildschirmmitte zu, da zu den Bildseiten hin sich die Weglängen des Elektronenstrahles vergrößern. Dies muß für die Gesamteinstellung der Konvergenz entsprechend berücksichtigt werden und kann nur in Abhängigkeit von der Ablenkung des Elektronenstrahles kompensiert werden. Die hierbei auftretenden Probleme werden wir im nächsten Abschnitt als dynamische Konvergenz kennenlernen. Die statische Konvergenz umfasst also nur die Einstellung in der Bildschirmmitte, da hierbei die Auslenkung der Elektronenstrahles noch keine wesentliche Rolle spielt im Gegensatz zur dynamischen Konvergenz, die für den gesamten Bildschirm Gültigkeit hat.

VIII. 5. Dynamische Konvergenz

Gleichmäßige Konvergenz über den gesamten Bildschirm mit den Einstellmitteln der statischen Konvergenz wäre nur zu erzielen, wenn der Leuchtschirm und die Lochmaske, bezogen auf den Ablenkmittelpunkt, in Form einer Kugelschale ausgebildet ist. Da jedoch die Farbbildröhre, genauso wie die normale Schwarz/Weiß-Bildröhre, einen nur leicht gewölbten Bildschirm besitzt, entstehen an den Bildseiten und in den Bildecken durch die unterschiedlichen Strahllängen Verzeichnungsfehler. Diese Verzeichnungsfehler treten auch als Abbildungsfehler in den Schwarz/Weiß-Empfängern als sogenannte Kissenverzeichnungen auf. In Abb. VIII. 5. 1. ist angedeutet, wie auf einem flachen Bildschirm bei gleichen Ablenkwinkeln eine kissenförmige Bildverzeichnung entsteht, weil sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung zu den Bildecken hin die Weglänge des Elektronenstrahles größer wird.

In Abb. VIII. 5. 2. sind diese Verzeichnungsfehler, bedingt durch den

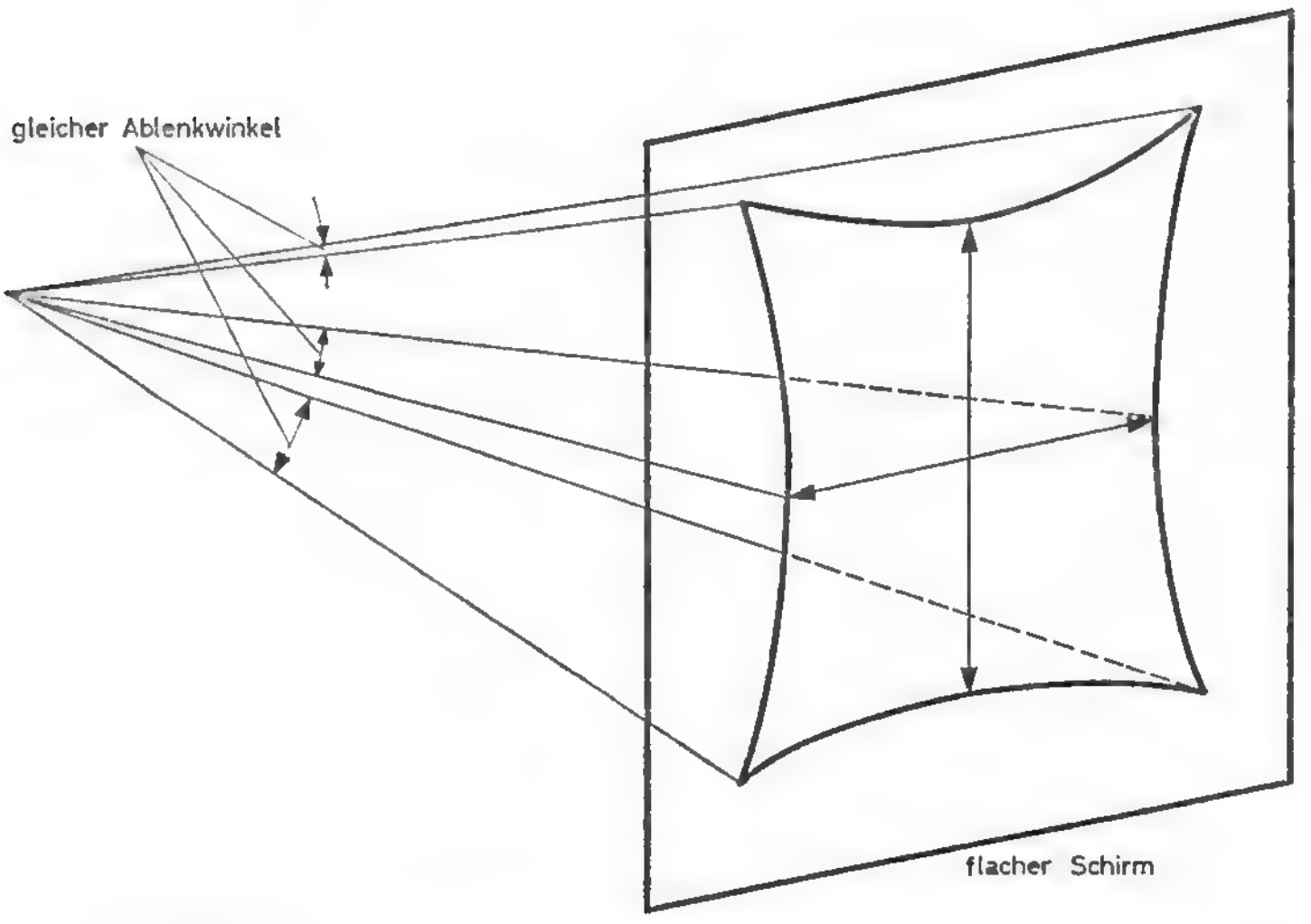


Abb. VIII. 5. 1. Kissenverzeichnung durch Abbildungsfehler auf flachem Schirm.

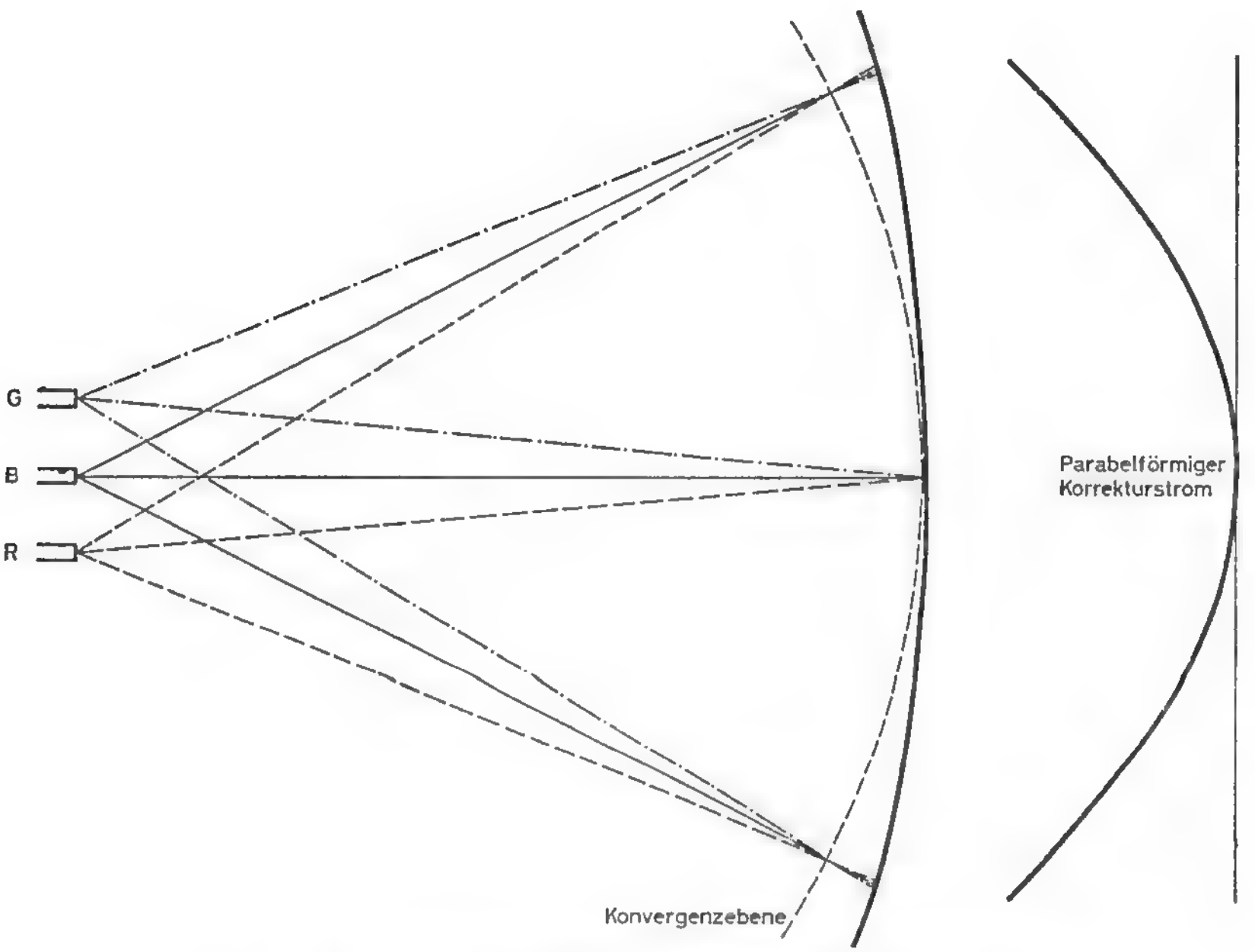


Abb. VIII. 5. 2. Konvergenzfehler durch flachen Schirm.

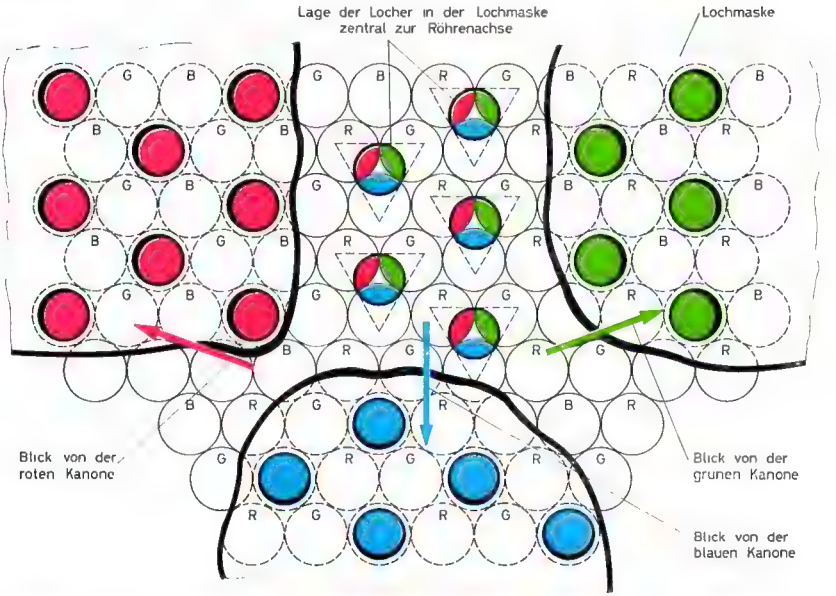


Abb. VIII. 4. 1. Relative Lage der Farbpunkte des Bildschirms zur Lochmaske.

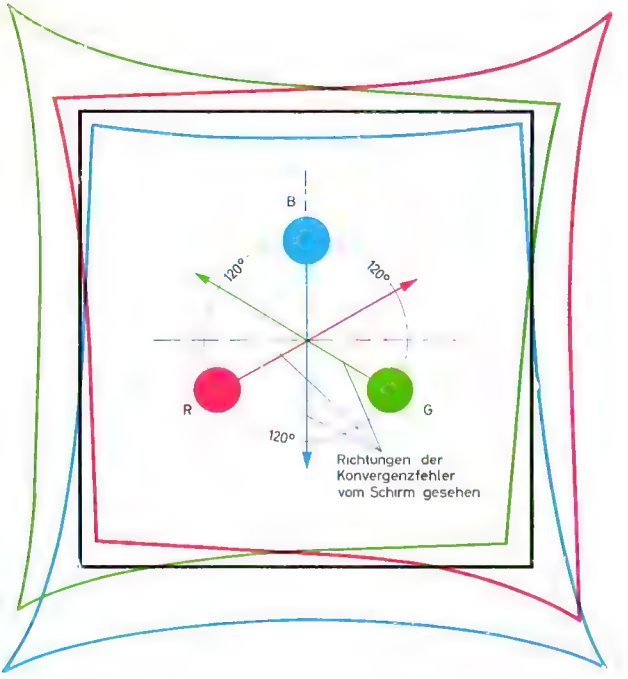


Abb. VIII. 3. 5. Durch Rasterverzeichnungen zusätzlich auftretende Konvergenzfehler.

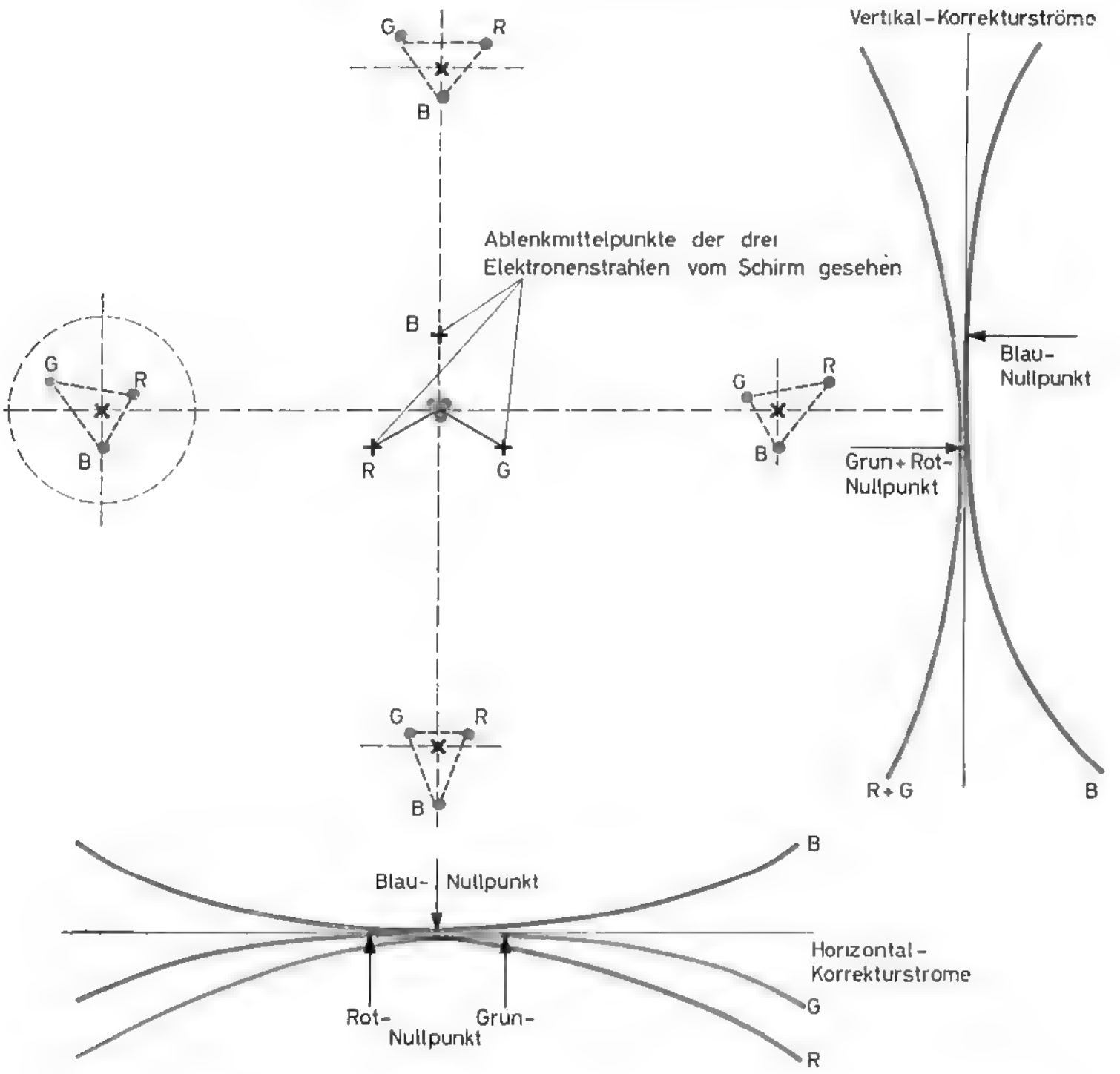
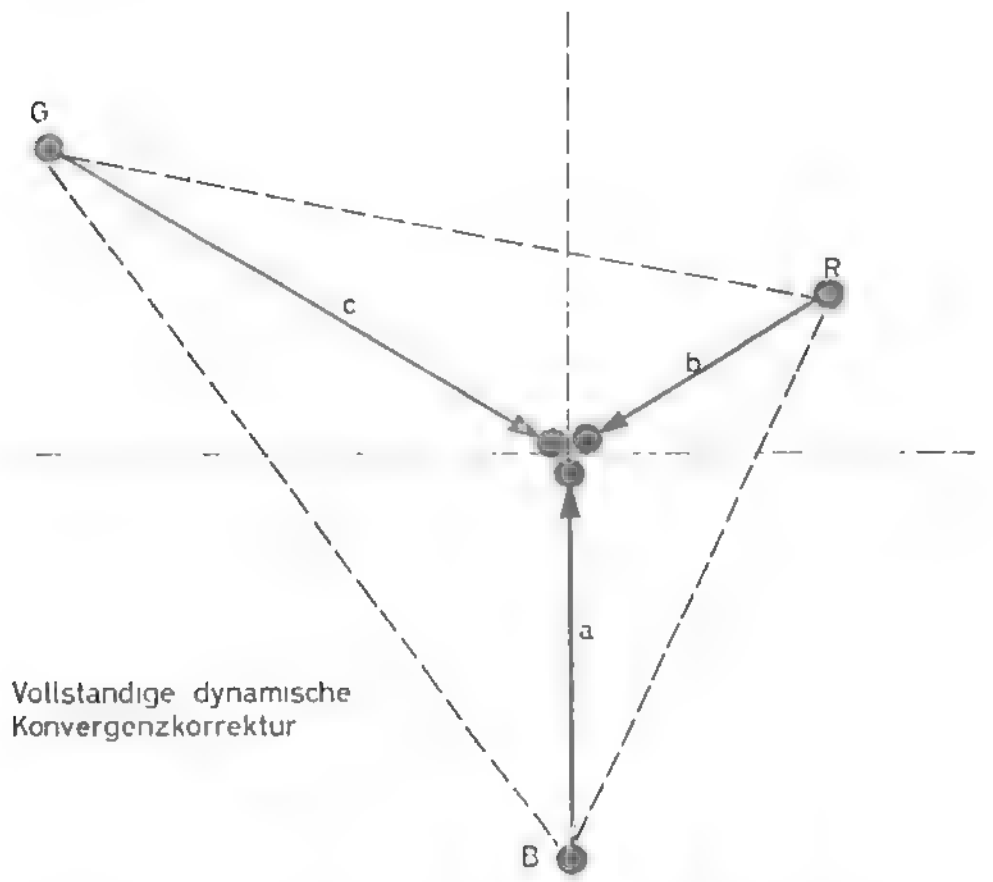


Abb. VIII. 5. 4. Konvergenzfehler und benötigte Korrekturströme.



VIII. 5. 5. Dynamische Konvergenzkorrektur für ein Farbtripel.

flachen Bildschirm, für die Konvergenz der drei Elektronenstrahlen eingezeichnet. Sind z.B. die drei Elektronenstrahlen in der Bildschirmmitte exakt zur Deckung gebracht, so bleibt dieser Deckungspunkt nur auf einem Kreisbogen für den Ablenkmittelpunkt erhalten. Durch die größere Weglänge an den Bildseiten und in den Bildecken werden die drei Elektronenstrahlen an diesen Stellen wieder auseinanderlaufen und sind beim Durchgang durch die Lochmaske nicht mehr in Deckung.

Da die Vergrößerung der Bildlänge zu den Bildseiten hin etwa parabelförmig zunimmt, kann man mit einem zusätzlichen Korrekturstrom, der parabelförmigen Charakter besitzt, ein Konvergenzmagnetfeld erzeugen, das dafür sorgt, daß abhängig von der Strahlauslenkung der Konvergenzpunkt verändert wird. Man muß also für die Korrektur der Konvergenz sowohl einen parabelförmigen Strom mit der Horizontalablenkfrequenz für die Kompensation in horizontaler Richtung als auch einen Korrekturstrom mit der Vertikalablenkfrequenz für die Kompensation in vertikaler Richtung zur Verfügung haben.

Neben diesen Konvergenzfehlern, die durch die unterschiedliche Weglänge der Elektronenstrahlen an den Bildseiten entstehen, tritt noch ein zweiter Fehler in Erscheinung, der dadurch entsteht, daß die drei Elektronenkanonen nicht im Mittelpunkt der Röhrenachse konzentriert sind. Jede Elektronenkanone ist zur Röhrenachse versetzt und schräg zu ihr geneigt. Dies bedeutet für die Projektion jeder Kanone auf den Bildschirm, daß in der Neigungsrichtung der Elektronenkanone zur Bildröhrenachse eine trapezförmige Abbildungsverzeichnung entsteht. Diese trapezförmigen Rasterverzeichnungen sind für alle drei Elektronenkanonen in der Abb. VIII. 5. 3. (S. 133) eingezeichnet.

Für die blaue Elektronenkanone, die oberhalb der Röhrenachse liegt, bedeutet dies z.B., daß senkrecht nach unten eine trapezförmige Rasterverzeichnung auftritt, da der Elektronenstrahl zu den beiden unteren Bildröhrenecken einen längeren Weg zurücklegen muß als zu den beiden oberen Bildröhrenecken. Symmetrisch zur Senkrechten tritt also eine trapezförmige Verzeichnung der blauen Elektronenkanone auf. Für die rote Elektronenkanone liegt eine asymmetrische Trapezverzeichnung vor, da diese Kanone, unter 120° zur Bildröhrenachse versetzt, eine Trapezverzeichnung in dieser Ablenkrichtung erzeugt. Der kürzeste Weg für den Elektronenstrahl der roten Kanone liegt in der linken unteren Ecke, während der längste Weg in der rechten oberen Ecke auftritt. Für die grüne Kanone tritt genau spiegelbildlich die gleiche asymmetrische trapezförmige Rasterverzeichnung wie bei der roten Kanone auf.

Für diese drei getrennten und in ihrer Form voneinander abweichenden

trapezförmigen Rasterverzeichnungen muß gleichfalls eine Kompensation und Korrektur vorgenommen werden. Die Grundform des benötigten Korrekturstromes zur Erzeugung eines Magnetfeldes, das diese trapezförmige Rasterverzeichnung kompensieren kann, ist ein sägezahnförmiger Strom. Diese sägezahnförmige Korrekturkomponente muß, genauso wie die parabelförmige Stromkomponente, für beide Ablenkrichtungen sowohl mit der Vertikal- als auch Horizontalablenkfrequenz erfolgen.

Um zunächst die Gesamtform des jeweils benötigten Korrekturstromes für die Kompensation der Konvergenzfehler durch die verlängerten Wege des Elektronenstrahles an den Bildseiten und die trapezförmige Rasterverzeichnung durch die Neigung der drei Elektronenkanonen zur Bildröhrenachse abzuschätzen, ist in Abb. VIII. 5.4. (S. 134) sowohl für den oberen und unteren Bildrand als auch für die linke und rechte Bildseite die Lage der drei Farbpunkte eingezeichnet, wenn keine dynamische Korrektur der Konvergenzfehler vorgenommen wird. Die Ablenkmittelpunkte der drei Elektronenstrahlen sowie die Lage der Farbbildpunkte sind so eingezeichnet, wie sie vom Bildschirm her gesehen erscheinen.

Betrachten wir zunächst wieder die blaue Elektronenkanone, so wird durch die Trapezverzeichnung zum unteren Bildrand hin der blaue Farbbildpunkt am unteren Bildröhrenrand stärker vom Konvergenzpunkt abweichen, als am oberen Bildrand. Diese beiden Abweichungen des blauen Farbpunktes vom Konvergenzpunkt sind etwa proportional mit der in Abb. VIII. 5. 3. eingezeichneten Bildverschiebung des blauen Farbrasters zum exakten Bildformat. Am linken und rechten Bildrand liegen die blauen Farbpunkte um gleiche Beträge unterhalb des Konvergenzpunktes. Um die Lage der blauen Farbbildpunkte so zu kompensieren, daß sie genauso wie in der Bildschirmmitte auch an den Bildrändern im Konvergenzpunkt zu liegen kommen, ist sowohl ein vertikaler Korrekturstrom als auch ein horizontaler Korrekturstrom durch die Spulen der Konvergenzeinheit nötig. Die Bewegungsrichtung des Elektronenstrahls der blauen Elektronenkanone kann durch die Anordnung der Polschuhe und des Konvergenzmagnetfeldes nur in der senkrechten Richtung erfolgen. Da für die blaue Elektronenkanone in der horizontalen Ablenkrichtung keine Trapezverzeichnung auftritt, braucht der Korrekturstrom auch nur die durch die vergrößerte Weglänge an den Bildseiten auftretende fehlerhafte Konvergenz zu kompensieren. Der horizontale Korrekturstrom für die blaue Elektronenkanone hat also einen reinen parabelförmigen Charakter, der symmetrisch zur senkrechten Bildröhrenachse liegt. Wenn wir das Minimum des Parabelstromes als Nullpunkt bezeichnen, so liegt dieser Nullpunkt für den blauen Korrekturstrom in horizontaler Richtung genau

auf der senkrechten Röhrenachse. Die Amplitude des Parabelstromes für die linke bzw. rechte Bildseite gibt dabei proportional den Weg der Auslenkung des Elektronenstrahles für die benötigte Konvergenzkorrektur an. Mit diesem horizontalen Korrekturstrom für die blaue Elektronenkanone wird also erreicht, daß bei der horizontalen Ablenkung, genauso wie in der Bildschirmmitte, auch am rechten bzw. linken Bildrand der blaue Bildpunkt im richtigen Konvergenzpunkt liegt. In der vertikalen Ablenkrichtung ist das gesamte Bildraster durch die trapezförmige Rasterverzeichnung nach unten verschoben. Es muß also, bezogen auf die Lage der blauen Elektronenkanone, der blaue Elektronenstrahl sowohl am oberen als auch am unteren Bildrand mit unterschiedlichen Größen nach oben verschoben werden. Im Gegensatz zur horizontalen Korrektur muß in der vertikalen Richtung neben dem symmetrischen Parabelstrom zur Kompensation der unterschiedlichen Weglänge des Elektronenstrahles noch eine sägezahnförmige Zusatzkomponente zur Rasterverschiebung nach oben vorhanden sein. Der Gesamtkorrekturstrom, der aus beiden Komponenten besteht, sieht also so aus, daß ein unsymmetrischer Parabelstrom mit kleinerer Amplitude am oberen Bildrand und entsprechend größerer Amplitude am unteren Bildrand benötigt wird. Der Nullpunkt dieses unsymmetrischen Parabelstromes liegt in der Höhe der blauen Elektronenkanone. Mit dieser Form des vertikalen Korrekturstromes für die blaue Elektronenkanone wird also bei senkrechter Ablenkung der blaue Farbpunkt sowohl am oberen als auch am unteren Bildrand, genauso wie in der Bildschirmmitte, mit dem erforderlichen Konvergenzpunkt zusammenfallen. Wenn man also in der horizontalen Ablenkrichtung einen horizontalen Korrekturstrom als symmetrischen Parabelstrom und für die Vertikalablenkung einen vertikalen Korrekturstrom, der eine asymmetrische Parabelform hat, gleichzeitig zur Kompensation der Konvergenzfehler für die blaue Elektronenkanone benutzt, so ist automatisch sichergestellt, daß auf dem gesamten Bildschirm an jedem Punkt der blaue Elektronenstrahl den Konvergenzpunkt trifft. Die richtige Konvergenz in den vier Bildecken z.B. ist dann automatisch sichergestellt, da ja immer gleichzeitig die horizontale und vertikale Korrektur wirksam ist. Es findet also in den Bildecken die Addition beider Korrekturkomponenten statt.

Für die Kompensation der grünen Konvergenzfehler sind jeweils zwei Korrekturströme in horizontaler und vertikaler Richtung nötig, die beide eine asymmetrische Parabelform besitzen, da in beiden Ablenkrichtungen eine Trapezverzeichnung zusätzlich zu den Konvergenzfehlern durch die unterschiedliche Weglänge der Elektronenstrahlen hinzukommt. Bedingt durch die Anordnung der Polschuhe und der Konvergenzmagnetfelder kann

sich der grüne Elektronenstrahl nur in der vorgezeichneten Bewegungsrichtung, um 120° gegen die blaue Kanone versetzt, bewegen. Die Amplituden des Korrekturstromes für den grünen Elektronenstrahl beziehen sich also jeweils auf diese Bewegungsrichtung unter 120°. Auch wenn es ein horizontaler bzw. vertikaler Korrekturstrom ist, wird keinesfalls eines Bewegung in horizontaler bzw. vertikaler Richtung vorgenommen. Beginnen wir wieder mit dem horizontalen Korrekturstrom, so muß zusätzlich zur symmetrischen Parabelkomponente für die unterschiedliche Weglänge des Elektronenstrahles eine Hauptverschiebungsrichtung des trapezförmig verzeichneten Rasters zur rechten Bildseite erfolgen. Der horizontale Korrekturstrom des grünen Elektronenstrahles hat also einen asymmetrischen parabelförmigen Charakter, wobei der Nullpunkt senkrecht unter der grünen Kanone liegt. Die Korrekturamplitude am rechten Bildrand ist also entsprechend kleiner als an der linken Bildseite. Proportional hierzu ist auch die Verschiebungsrichtung für den grünen Elektronenstrahl immer unter 120° zur senkrechten Achse zu betrachten. Mit diesem horizontalen Korrekturstrom wird bei horizontaler Ablenkung der grüne Elektronenstrahl in der gesamten Zeile vom linken bis zum rechten Bildrand jeweils auf dem richtigen Konvergenzpunkt zu liegen kommen. In der vertikalen Ablenkrichtung muß das trapezförmig verzeichnete grüne Bildraster nach unten verschoben werden. Die Parabelkomponente für den vertikalen Korrekturstrom muß also am oberen Bildrand eine größere Amplitude als am unteren Bildrand aufweisen, wobei der Nullpunkt wieder in der Höhe der grünen Kanone liegt. Mit dieser Kompensation ist sichergestellt, daß auf der senkrechten Achse die grünen Farbpunkte alle im Konvergenzpunkt zu liegen kommen, so daß zusammen mit der horizontalen Korrektur auch für den grünen Elektronenstrahl auf dem gesamten Bildschirm die Konvergenzpunkte erreicht werden.

Für den Elektronenstrahl der roten Elektronenkanone ergeben sich spiegelbildlich die gleichen Verhältnisse wie für die grüne Elektronenkanone. Wiederum um 120° gegen die blaue Kanone versetzt, liegt die Bewegungsrichtung dieses roten Elektronenstrahles. In der horizontalen Richtung verschiebt sich also das trapezförmig verzeichnete rote Bildraster um den gleichen Betrag nach links, wie vorher das grüne Bildraster nach rechts. Für die vertikale Korrektur ergibt sich für die rote Elektronenkanone die gleiche Form des asymmetrischen Parabelstromes wie für die grüne Elektronenkanone, da bezogen auf die senkrechte Bildröhrenachse, beide Elektronenkanonen die gleiche räumliche Lage aufweisen. Zusammen mit dem horizontalen Korrekturstrom ist also dann auch für die rote Elek-

tronenkanone sichergestellt, daß über den gesamten Bildschirm eine einwandfreie Konvergenz erzielt werden kann.

Greifen wir noch einmal ein bestimmtes Farbtripel mit seinen Bewegungsrichtungen für die dynamische Konvergenzkorrektur heraus, so können wir uns alle durch die Korrekturströme hervorgerufenen Bewegungsrichtungen zusammen ansehen.

In der Abb. VIII. 5. 5. (S. 134) ist das Farbtripel vom linken Bildrand der Abb. VIII. 5.4. vergrößert herausgezeichnet.

Der blaue Elektronenstrahl führt seine Bewegungsrichtung nur in der senkrechten Ebene aus. Entsprechend der Amplitudenlänge „a" wird am linken Bildrand für die horizontale Kompensation ein Parabelstrom dieser Amplitudengröße benötigt. Der Strahl der grünen Elektronenkanone benötigt am linken Bildrand einen Korrekturstrom entsprechend der Länge „c". Dieser Korrekturstrom setzt sich aus dem Anteil des horizontalen Korrekturstromes und der vertikalen Korrekturkomponente zusammen. Für den roten Elektronenstrahl erhält man entsprechend der Länge „b" in der Bewegungsrichtung für die rote Elektronenkanone gleichfalls einen horizontalen und vertikalen Anteil des Korrekturstromes. Sind sowohl für die blaue als auch für die grüne und rote Elektronenkanone diese Korrekturströme in richtigen Amplitudengrößen gleichzeitig vorhanden, so treffen sich die drei Elektronenstrahlen im vorgegebenen Konvergenzpunkt. Diese dynamische Konvergenzkorrektur zur Kompensation der unterschiedlichen Weglängen der drei Elektronenstrahlen als auch der Trapezverzeichnungen setzt also voraus, daß sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Ablenkrichtung jeweils die Amplitude und der Nullpunkt des Korrekturstromes geregelt werden muß. Diese erforderlichen Regel- und Einstellmöglichkeiten ergeben also insgesamt zwölf Einstellungen, nämlich für jede Elektronenkanone die Amplitude und den Nullpunkt sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Ablenkrichtung, also pro Elektronenkanone vier Regelmöglichkeiten. Auch für die blaue Kanone sieht man in horizontaler Richtung die Regelung des Nullpunktes des Parabelstromes vor, um Fertigungs- und Schaltungstoleranzen auffangen zu können. Hieraus erkennt man bereits, daß mit diesen zwölf Einstellmöglichkeiten und ihrer gegenseitigen Abhängigkeit eine umfangreiche Bildröhrenjustage verbunden ist.

Da wir jetzt die benötigte Form des erforderlichen Korrekturstromes kennen, wollen wir als nächsten Schritt die Erzeugung bzw. Zusammensetzung und die Regelmöglichkeit dieser Stromgrößen betrachten. Die Grundkomponente sowohl des horizontalen als auch vertikalen Korrekturstromes ist ein parabelförmiger Strom. Zusätzlich zu dieser parabelförmigen

Komponente muß eine einseitige Verschiebung des Nullpunktes des Parabelstromes erfolgen, also eine sägezahnförmige Überlagerung für die Kompensation der Trapezverzeichnung vorgenommen werden. In Abb. VIII. 5. 6. ist angedeutet, wie man einem symmetrischen Parabelstrom einen positiven bzw. negativen Sägezahnstrom überlagern kann und dadurch einen asymmetrischen Parabelstrom erhält, dessen Nullpunkt sich, abhängig von der Polung des Sägezahnstromes, nach links oder rechts verlagern läßt.

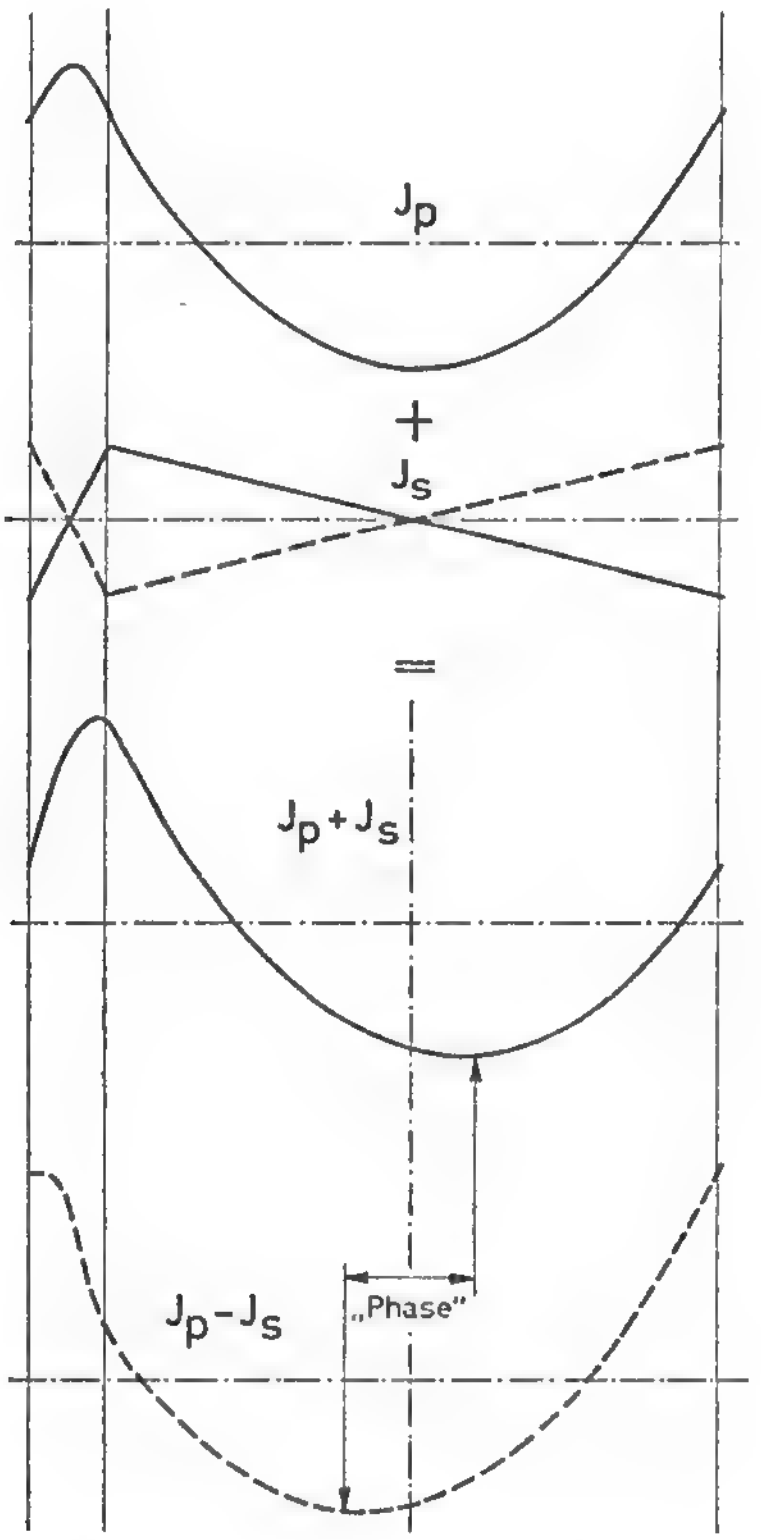


Abb. VIII. 5. 6. Addition von Sägezahn- und Parabelstrom.

Diese Verlagerung des Nullpunktes des parabelförmigen Stromes kann man auch als „Phase" des Parabelstromes bezeichnen. In einer praktischen Schaltung ist dies für die vertikale Konvergenzkorrektur in Abb. VIII. 5. 7. eingezeichnet.

Es werden zur Einstellung zwei Potentiometer benutzt zwischen deren Schleifern die Konvergenzspule für die vertikale Konvergenzkorrektur an-

geordnet ist. Dem einem Potentiometer, welches mit seinem kalten Ende an Masse liegt, wird eine Parabelspannung zugeführt. Dem anderen Potentiometer, dessen Mittelabgriff geerdet ist, führt man gegenphasige

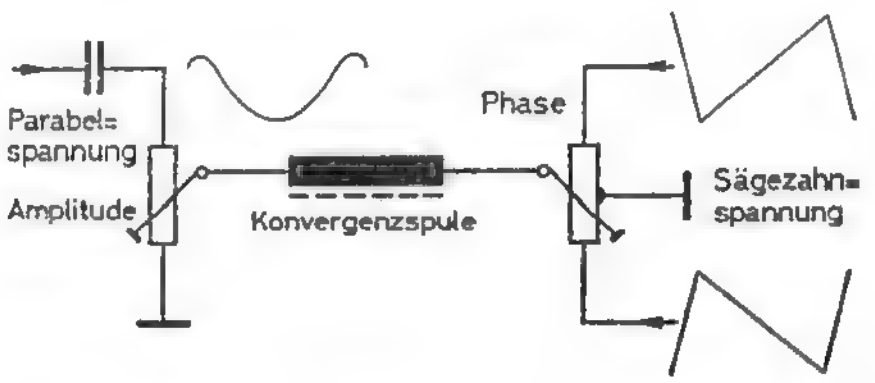


Abb. VIII. 5. 7. Konvergenzschaltung für dynamische Vertikal-Korrektur.

Sägezahnspannungen zu. Da für die vertikale Ablenkfrequenz die Konvergenzspule in der Hauptsache einen ohmschen Widerstand darstellt, wird der Strom, der durch die Konvergenzspule fließt, von der angelegten Spannung bestimmt. Liegt z.B. der Schleifer des rechten Potentiometers in der Mittelstellung, d.h. an Masse, so fließt durch die Konvergenzspule vom linken Potentiometer her ein Parabelstrom, dessen Amplitudengröße von der angelegten Parabelspannung und damit von der Stellung des Schleifers des linken Potentiometers bestimmt wird. Denkt man sich umgekehrt den Schleifer des linken Potentiometers an Masse, also in der unteren Stellung, so fließt durch die Konvergenzspule vom rechten Potentiometer her je nach Schleiferstellung ein positiver oder negativer Sägezahnstrom. Der Gesamtstrom durch die Konvergenzspule besteht also aus einem Anteil eines Parabelstromes, dessen Amplitude vom linken Potentiometer bestimmt wird und einem Sägezahnstrom, dessen Amplitude und Polarität vom Schleifer des rechten Potentiometers eingestellt werden kann. Der fließende Gesamtstrom hat also eine asymmetrische Parabelform, dessen Amplitudengröße und dessen Nullpunkt bzw. „Phase“ von den beiden Potentiometereinstellungen abhängig ist. Für die vertikale Konvergenzkorrektur kann man also nach dieser Schaltanordnung mit je einer Konvergenzspule für die drei Elektronenkanonen alle erforderlichen Korrekturgrößen einstellen.

Für die Horizontal-Konvergenzkorrektur muß man nach dem gleichen Grundprinzip wie für die Vertikal-Konvergenzkorrektur eine Schaltung aufbauen, mit der es möglich ist, die Zusammensetzung des Korrekturstromes aus einem Parabel- und einem Sägezahnanteil vorzunehmen. Im Gegensatz zu der Schaltanordnung für die Vertikal-Konvergenzkorrektur muß bei der Erzeugung der Korrekturströme für die Horizontal-Konver-

genzkorrektur beachtet werden, daß die Konvergenzspule für die Horizontalfrequenz von 15 625 Hz einen überwiegend induktiven Charakter besitzt und ihr ohmscher Widerstand vernachlässigt werden kann. Eine komplette Schaltungsanordnung für die Konvergenz der dynamischen Horizontalkorrektur ist in Abb. VIII. 5. 8. angedeutet.

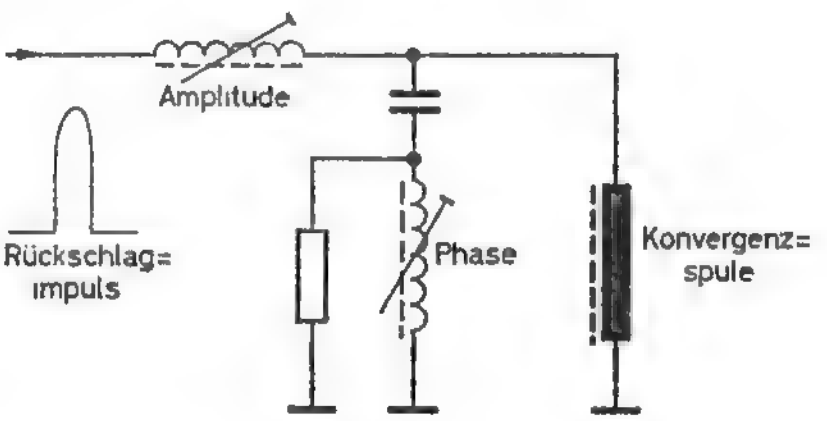
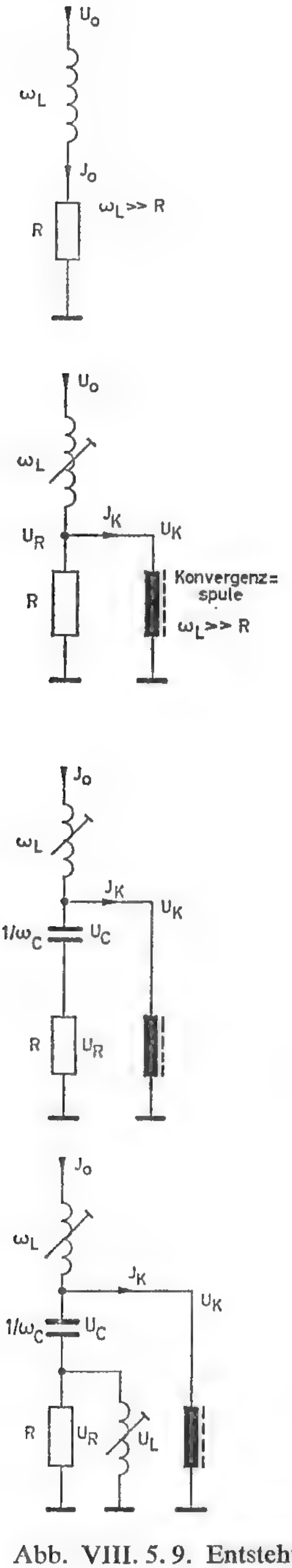


Abb. VIII. 5. 8. Konvergenzschaltung für dynamische Horizontal-Korrektur.

Es wird der positive Rückschlagimpuls des Horizontal-Ausgangstransformators einer regelbaren Induktivität zugeführt, mit der in Serie die Konvergenzspule liegt. Parallel zur Konvergenzspule ist ein Kondensator in Serie mit einer weiteren regelbaren Induktivität, zu der parallel ein Widerstand liegt, angeordnet. Mit der ersten regelbaren Induktivität kann die Amplitude des Parabelstromes und mit der zweiten regelbaren Induktivität der Sägezahnanteil und damit die Phase des Parabelstromes verändert werden.

Betrachtet man, von der angelegten Spannungsform ausgehend, die fließende Ströme, so kann man eine vereinfachte Darstellung wählen und den Aufbau des Parabel- und Sägezahnstromes stufenweise, wie in Abb. VIII. 5. 9. angedeutet, vornehmen. Zunächst betrachten wir nur die erste Induktivität in Serie mit dem ohmschen Widerstand. Der induktive Widerstand ist hierbei sehr viel größer als der ohmsche Widerstand. Es wird also der fließende Strom über die Induktivität und den ohmschen Widerstand praktisch nur vom induktiven Widerstand bestimmt. Liegt am Eingang dieser Serienschaltung eine Rechteckspannung, wie es praktisch der Rückschlagimpuls am Horizontal-Ausgangstrafo darstellt, so ist der fließende Strom sägezahnförmig, womit auch am ohmschen Widerstand eine Sägezahnspannung entsteht. Ordnet man jetzt parallel zum ohmschen Widerstand eine Konvergenzspule an, deren induktiver Widerstand wesentlich größer ist, als der ohmsche Widerstand, so liegt parallel zur Konvergenzspule die Spannungsform des ohmschen Widerstandes, also die Sägezahnspannung. Diese Sägezahnspannung an der Induktivität der Konvergenzspule läßt durch die Konvergenzspule einen parabelförmigen Strom



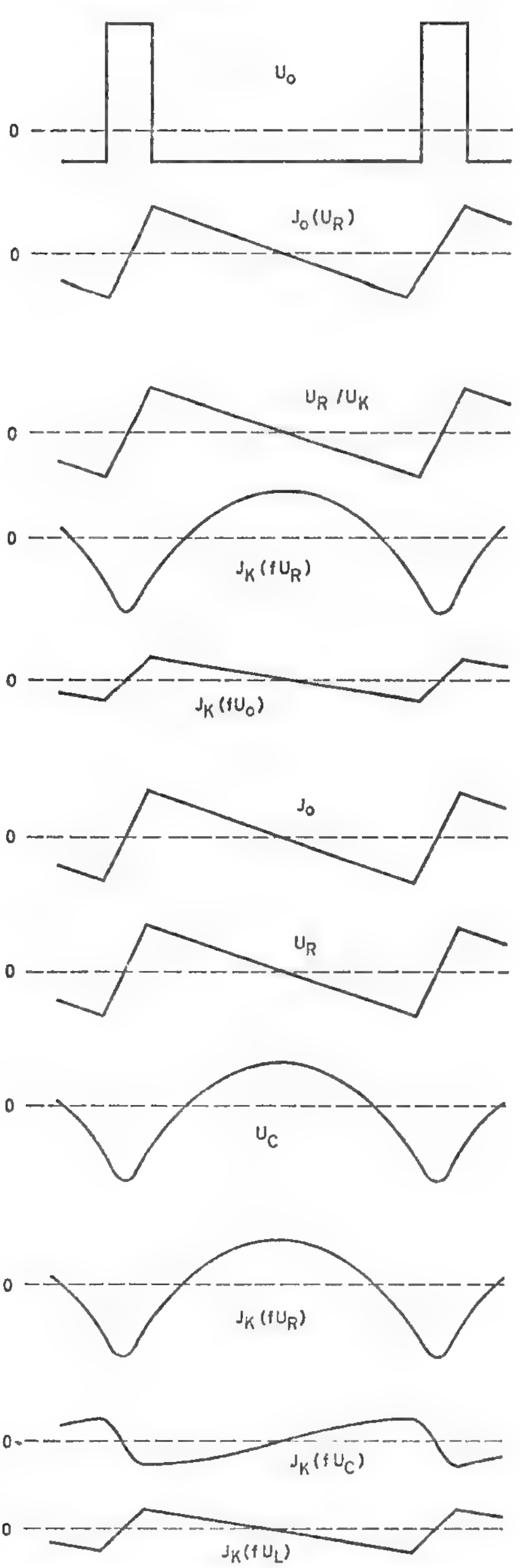


Abb. VIII. 5. 9. Entstehung der Korrekturströme für die dynamische Horizontal-Konvergenz.

fließen. Regelt man die am Eingang liegende Induktivität, so wird hierdurch der fließende Sägezahnstrom und damit die Sägezahnspannung am Widerstand variiert, wodurch dann wiederum die Größe der Parabelstromes verändert werden kann.

Neben diesem Parabelstrom fließt durch die Konvergenzspule noch ein Sägezahnstrom, hervorgerufen durch die Spannungsteilung über die regelbare Induktivität und die Konvergenzspule, da an dieser Serienschaltung beider Induktivitäten die Rechteckspannung liegt und damit einen Sägezahnstrom hervorruft. Um diesen Sägezahnanteil kompensieren bzw. regeln zu können, liegt in Serie mit dem Widerstand ein Kondensator. Durch diesen Kondensator fließt, genauso wie durch den Widerstand, der von der regelbaren Induktivität bestimmte Sägezahnstrom. Durch diesen Sägezahn-

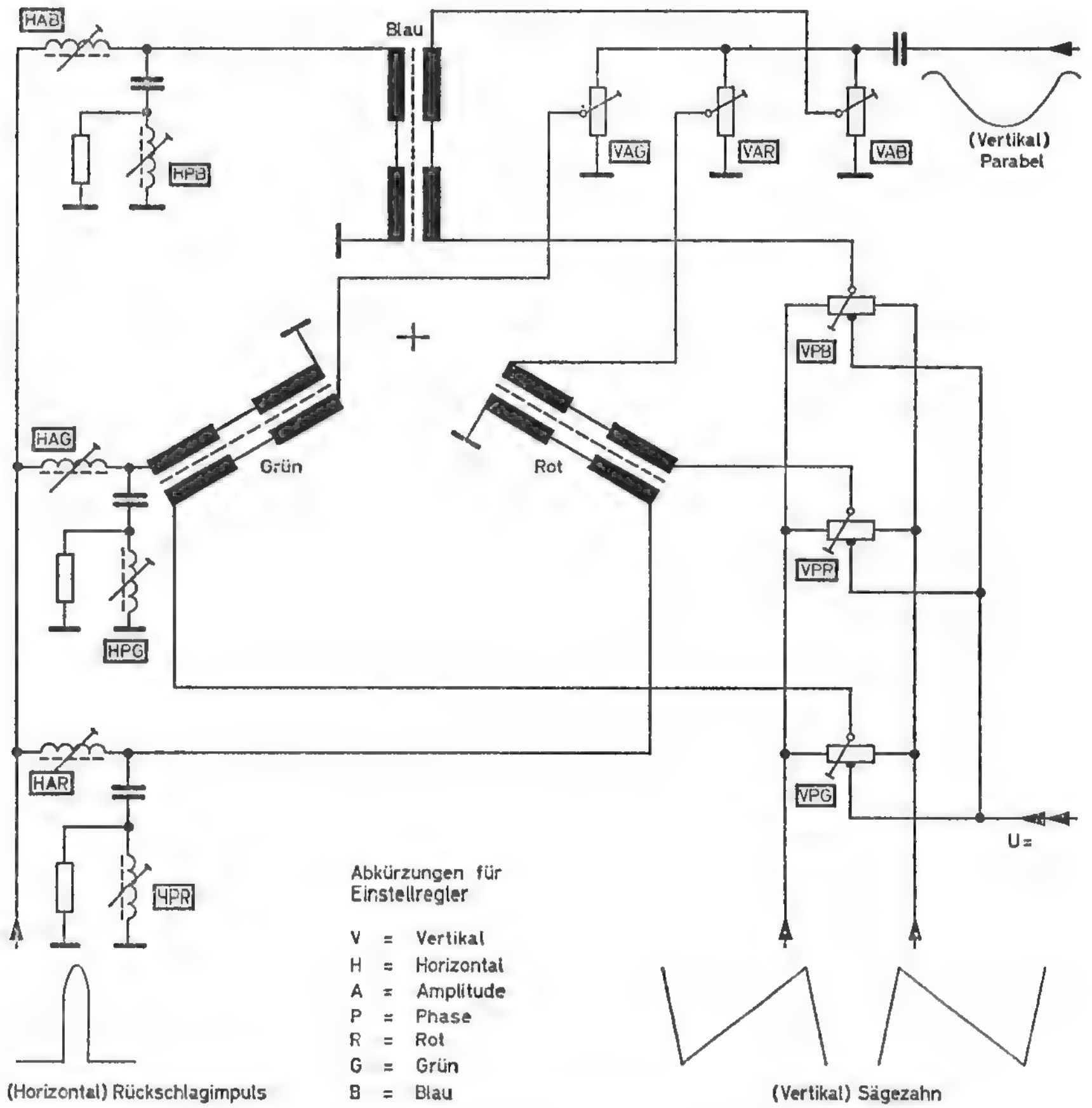


Abb. VIII. 5. 10. Komplette Konvergenzschaltung.

strom hervorgerufen, baut sich am Kondensator eine parabelförmige Spannung auf. Dies bedeutet, daß an der Konvergenzspule jetzt neben der Sägezahnspannung des Widerstandes auch noch die parabelförmige Spannung des Kondensators liegt, da beide Spannungen für die Konvergenzspule in Serie geschaltet sind. Die parabelförmige Spannung des Kondensators treibt durch die Induktivität der Konvergenzspule einen S-förmigen Strom, der sägezahnnähnlichen Charakter hat. Es addiert sich jetzt also in der Konvergenzspule der S-förmige Strom, bestimmt durch die Parabelspannung des Kondensators, mit dem Sägezahnanteil der Eingangsspannung.

Bei gleichen Größen heben sich der Sägezahnanteil und der S-förmige Strom auf, da beide gegenphasig sind. Um den sägezahnförmigen Stromanteil regeln zu können, ordnet man parallel zum Widerstand eine weitere veränderliche Induktivität, die als Parallelschaltung zur Konvergenzspule die Größe des durch die Konvergenzspule fließenden Sägezahnstromes beeinflußt. Man kann also durch diese zweite regelbare Induktivität parallel zum ohmschen Widerstand den sägezahnförmigen Stromanteil, der in gegenpoliger Phasenlage zum S-förmigen Stromanteil durch die Konvergenzspule fließt, beeinflussen, so daß hiermit der Nullpunkt bzw. die Phase des Parabelstromes verändert werden kann. Der durch die Horizontal-Konvergenzspule fließende Korrekturstrom hat damit die gleiche Form, wie in der Vertikal-Konvergenzspule, nur daß für die Horizontal-Konvergenz die Regelung mit zwei veränderlichen Induktivitäten vorgenommen wird.

Zusammengefaßt ist in Abb. VIII. 5.10. eine komplette Konvergenzschaltung für die drei Elektronenkanonen mit den jeweils vier Regelmöglichkeiten eingetragen.

Zusammenfassung

Abgesehen von der Wiedergabe farbiger Bilder durch drei Farbröhren, deren Bilder durch Projektion zur Deckung gebracht werden, kann man die Farbbildröhren in zwei Hauptgruppen einteilen. Einmal kann man mit einer Elektronenkanone und der Aufteilung der Leuchtschicht in dreifarbige Streifen die Farbwiedergabe nacheinander, also in einem Sequenzverfahren, wiedergeben. Hierbei muß der Elektronenstrahl auf die verschiedenfarbigen Leuchtschichtstreifen gesteuert bzw. umgelenkt werden, so daß ein zusätzliches Farbsteuerungsschema, das gleichzeitig die Ausgangsspannungen der Farbkanäle mitsteuert, vorhanden sein muß. Zum anderen kann man durch drei Elektronenstrahlen je eine Leuchtstoffgruppe in der dazugehörigen Primärfarbe anregen, so daß die Farbwiedergabe gleichzeitig, d.h. in einem Simultanverfahren, erfolgt. Das letzte Prinzip ist

in der Lochmasken-Röhre verwirklicht, der einzigen Röhre, die sich bisher für normale Bandfertigung durchgesetzt hat.

Alle anderen Bildröhrentypen, die zur ersten Gruppe gehören, wie z.B. die „Lawrence"- oder „Chromatron"-Röhre, die „Apple-Tube" bzw. „Zebra-Tube" und die „Banana-Tube", sind bisher über das Laborstadium nicht hinausgekommen. Die Lochmasken-Röhre ist dabei so aufgebaut, daß die Leuchtschicht jeweils aus Farbtripeln mit den Farbpunkten Rot, Grün und Blau besteht, wobei die Lochmaske mit ihren Löchern so angeordnet ist, daß diese Löcher genau im Mittelpunkt der Farbtripel liegen. Eine zusätzliche Konvergenzspuleneinheit sorgt dafür, daß über je ein inneres Polschuhpaar die drei Elektronenstrahlen auf dem gesamten Bildschirm in der Ebene der Lochmaske exakt zur Deckung kommen, d.h. konvergieren. Für die statische Konvergenz, d.h. die Einstellung der Deckungsmagnete, während für die dynamische Konvergenzkorrektur an den Bildpunkte in der Bildschirmmitte, dienen meistens verschiebbare Dauerrändern Parabel- und Sägezahnströme der Horizontal- und Vertikalablenkfrequenz herangezogen werden. Diese dynamische Konvergenzkorrektur kompensiert die Fehler, die durch die räumliche Anordnung der drei Elektronenkanonen außerhalb der Bildröhrenachse entstehen und die durch die unterschiedliche Weglänge der Elektronenstrahlen durch den flachen Bildschirm hervorgerufen werden.

Anhang

Zur dynamischen Korrektur der Konvergenzschaltung werden Korrekturströme benötigt, die sägezahn- und parabelförmigen Verlauf aufweisen. Diese Ströme werden durch Konvergenzspulen geschickt, die für die Vertikalablenkung ohmschen und für die Horizontalablenkung induktiven Charakter besitzen. Daneben werden Korrekturspannungen mit herangezogen, die durch Sägezahnströme an Kondensatoren entstehen. Es soll deshalb nachstehend noch einmal eine kurze Zusammenfassung über die Zusammenhänge zwischen Sägezahnspannungen und -ströme an Spulen und Kondensatoren erfolgen und eine Methode angegeben werden, wie man ohne jeden Rechnungsgang mit reinen grafischen Mitteln diese Strom- und Spannungsformen voneinander ableiten kann.

Fließt ein Strom durch eine Induktivität, so entsteht nur dann eine Spannung, wenn dieser Strom sich zeitlich verändert. Ein konstant fließender Strom, also ein Gleichstrom, kann an der Induktivität keinen Spannungsabfall hervorrufen, wenn man davon ausgeht, daß der ohmsche Verlustwiderstand der Spule zu vernachlässigen ist. Der Zusammenhang

zwischen Strom und Spannung an einer Induktivität ist gegeben durch: $U_L = L \cdot \triangle i/\triangle t$. Dies bedeutet, daß die Spannung an einer Induktivität direkt proportional der Größe dieser Induktivität ist und von der Stromänderung pro Zeiteinheit bestimmt wird. Je größer also die Stromänderung in einer bestimmten Zeiteinheit wird, bzw. in je kürzerer Zeit eine bestimmte Stromänderung erfolgt, desto größer wird die an der Induktivität entstehende Spannung. Die Bezeichnung $\triangle i/\triangle t$, also Stromänderung pro Zeiteinheit, wird in der Mathematik als Differentialquozient bezeichnet, so daß man Schaltelemente, die die gleiche elektrische Wirkung zeigen, als Differenzierglieder bezeichnet. Ausgehend vom Strom wird also an einer Induktivität eine Spannung entstehen, die die differenzierte Form des Stromes darstellt. Um ohne jeden Rechnungsgang aus einer bestimmten Stromform die differenzierte Größe ablesen zu können, gibt es eine einfache grafische Methode. Wir betrachten zu diesem Zweck verschiedene Stromformen, die eine Induktivität durchfließen, um daraus die Spannungsformen abzuleiten. Die einfachste sich ändernde Stromform stellt ein linear mit der Zeit anwachsender Strom dar, bekannt als normaler Sägezahnstrom.

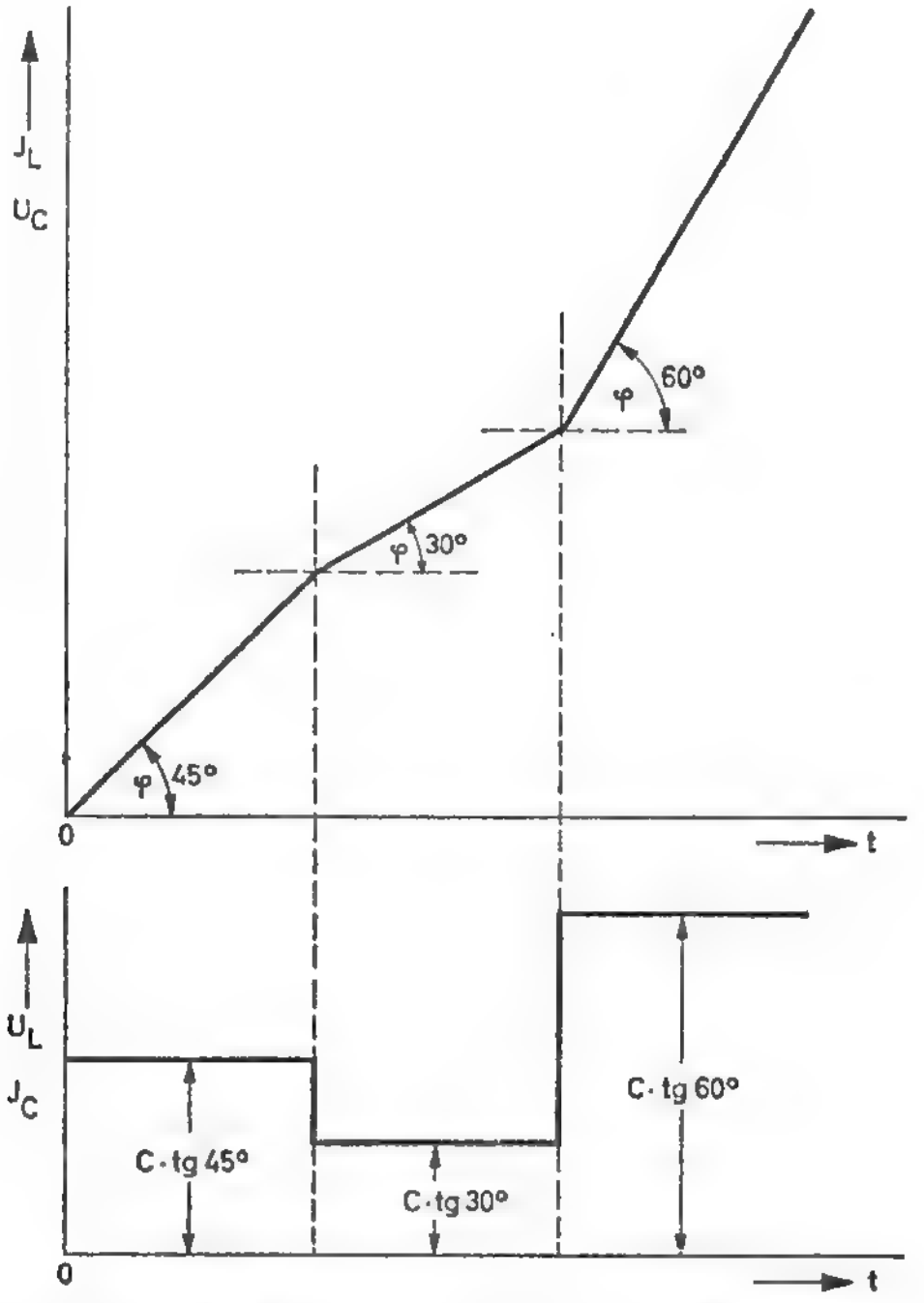


Abb. VIII. A. 1. Spannungs- und Stromverlauf bei linearer Änderung.

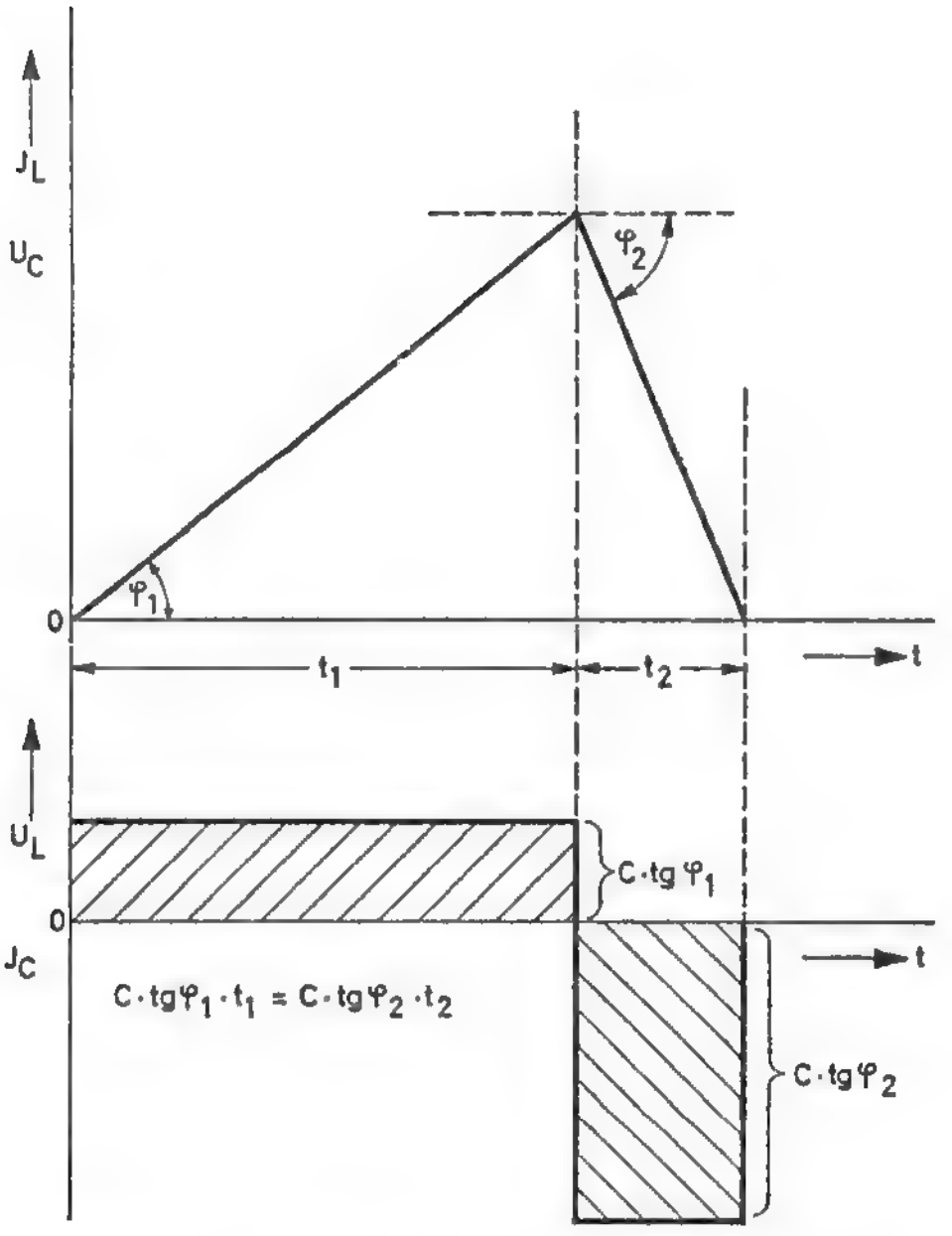


Abb. VIII. A. 2. Spannungs- und Stromverlauf bei gegenpoliger, linearer Änderung.

In Abb. VIII. A. 1. ist ein derartiger Strom in drei Abschnitten verschieden stark ansteigend eingezeichnet. Da für die Größe der Spannung, abgesehen von der Induktivität selbst, die Stromänderung pro Zeiteinheit maßgebend ist, gibt der Neigungswinkel des Stromanstieges ein direktes Maß für die auftretende Spannung. Das Verhältnis Stromänderung zu Zeiteinheit ist durch den Tangens des Winkels gebildet, den die Stromkurve mit der Waagerechten bildet.

In unserer Abb. VIII. A. 1. haben wir im ersten Teilabschnitt diesen Winkel mit 45°, im zweiten Teilabschnitt mit 30° und im letzten mit 60° eingezeichnet. Die Spannung ist also jeweils direkt proportional dem tg 45°, tg 30° und tg 60°. Es gibt also eine treppenförmige Spannung.

Lassen wir den Strom jetzt linear ansteigen und dann ebenso linear wieder abfallen, so ergibt sich die bekannte Form eines periodischen Sägezahnes. (Abb. VIII. A. 2.).

In der ersten Hälfte bei einem mit der Zeit linear anwachsenden Strom erhalten wir, bestimmt durch den tg des Winkels φ_1, eine konstante positive Spannung. In der Zeit t_2, wo der Strom linear abnimmt, ergibt sich durch

den negativen Winkel φ_2 eine negative Spannung. Zu beachten ist hierbei, daß zwangsläufig die gebildeten Flächen beider Spannungen oberhalb bzw. unterhalb der Null-Linie gleich groß sind, wenn es periodisch sich wiederholende Stromänderungen sind.

In der Abb. VIII. A. 3. ist eine Stromform eingetragen, die einen parabelförmigen Verlauf zeigt. Um hieraus die an der Induktivität entstehende Spannungsform abzuleiten, brauchen wir nur an verschiedenen Punkten dieser Stromkurve die Tangente anzulegen, um aus dem sich bildenden Winkel φ die dazugehörige Größe des Tangens abzuschätzen.

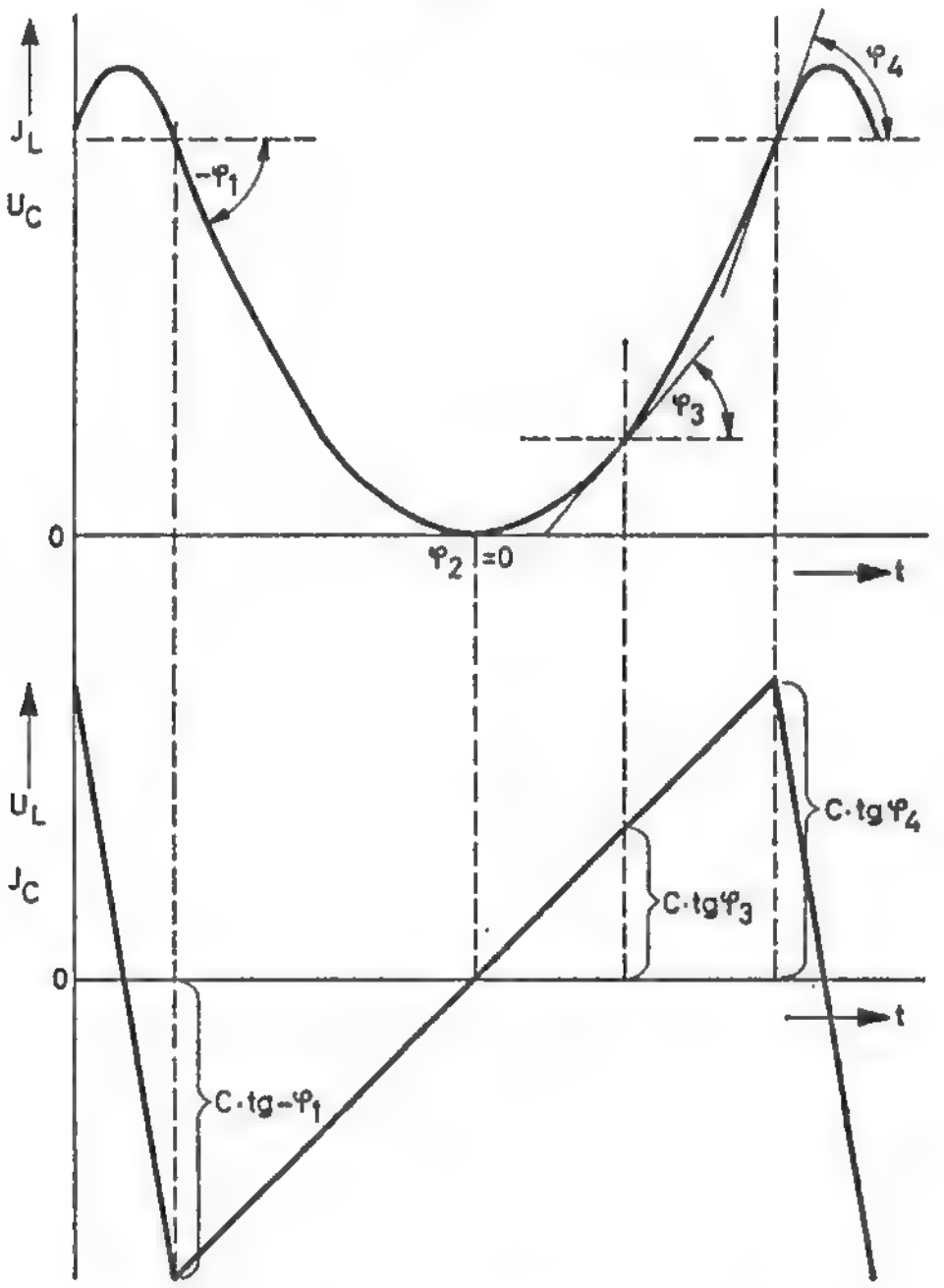


Abb. VIII. A. 3. Spannungs- und Stromverlauf bei parabelförmiger Änderung.

Der negative Winkel φ_1 ergibt z.B. einen negativen Betrag, der genau so groß ist wie der positive Wert für den Winkel φ_4. Bei φ_2 verläuft die Tangente waagerecht und der Winkel ist Null und damit auch der Wert des Tangens, während bei φ_3 der Tangens halb so groß ist wie bei φ_4. Werden diese Werte entsprechend eingetragen und miteinander verbunden, so sehen wir, daß wir einen linearen durch Null gehende Spannungsverlauf erhalten.

Betrachten wir die in Abb. VIII. A. 4. eingezeichnete Stromform, die

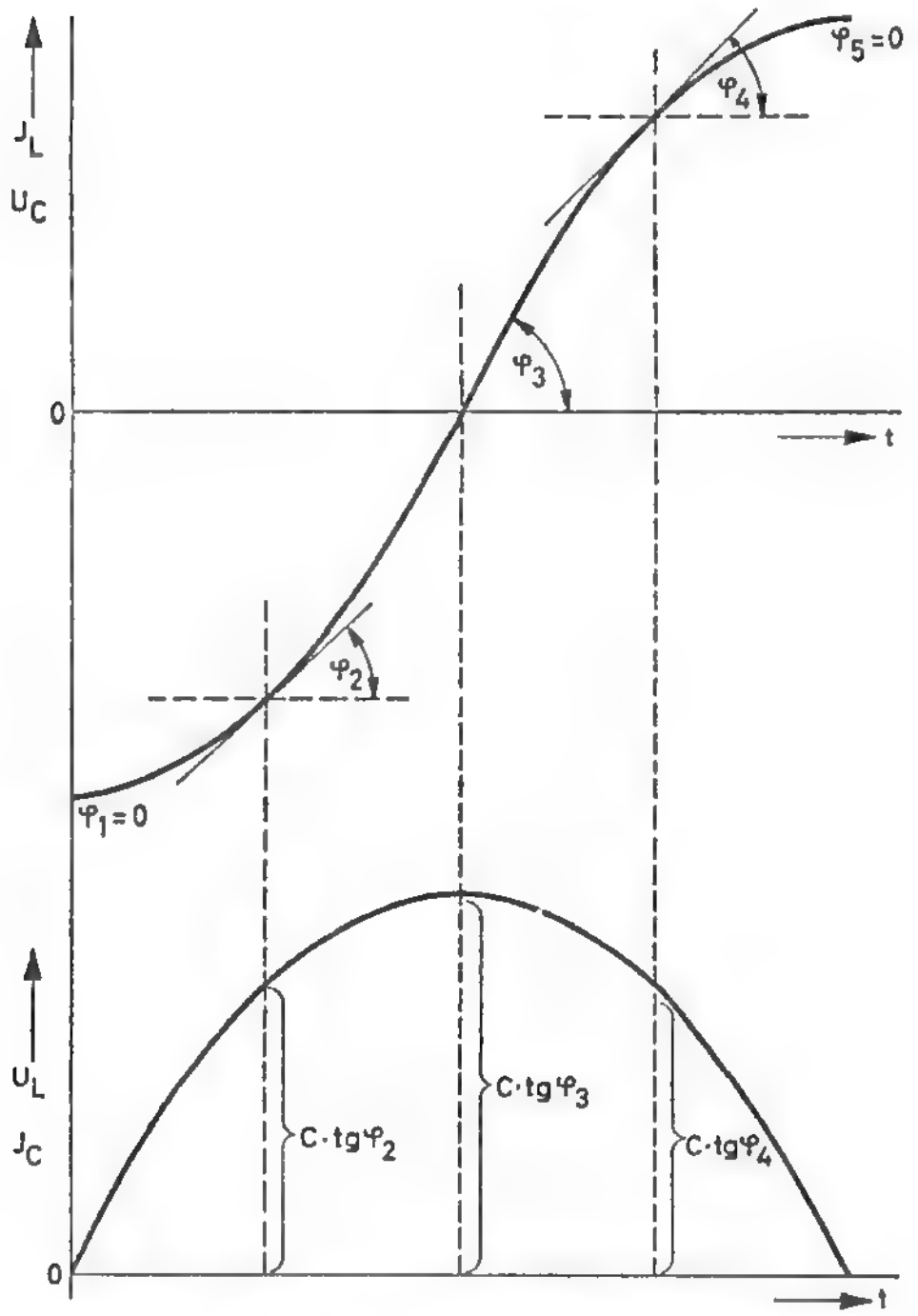


Abb. VIII. A. 4. Spannungs- und Stromverlauf bei S-förmiger Änderung.

einen S-förmigen Verlauf zeigt, so erkennen wir, daß für die beiden Endpunkte der Winkel φ_1 und φ_5 und damit auch der Tangens Null ist, während in der Mitte bei φ_3 der größte Winkel und hierdurch der höchste positive Wert erhalten wird. Die Winkel φ_2 und φ_4 liefern gleichfalls positive Werte mit entsprechend kleinerer Amplitude. Die Verbindung der einzelnen Punkte ergibt in diesem Fall einen parabelförmigen Spannungsverlauf.

Als letztzs wollen wir die normale Sinuskurve für unseren Stromverlauf betrachten (Abb. VIII. A. 5.). Der größte Winkel tritt im Nulldurchgang auf, wobei der Winkel φ_0 positiv und bei φ_2 negativ ist. Für die Spannungsform ergibt sich also an diesen Punkten ein positiver bzw. gleich großer negativer Wert. Von φ_0 bis φ_1 nimmt der Winkel von seinen größten Wert bis auf Null ab. Durch Verbindung der einzelnen Tangenswerte erhält man die bekannte Cosinus-Form. Bei einem sinusförmigen Stromverlauf hat die Spannungsform an der Induktivität also cosinusförmigen Charakter und eilt dem Strom um 90° vor. Man kann nach dieser grafischen Methode

jeden beliebig geformten Stromverlauf differenzieren, d.h. die an einer Induktivität entstehende Spannungsform ableiten. Zu diesem Zweck braucht man also nur an verschiedenen Punkten der Stromkurve die Tangente anzulegen und für den sich bildenden Winkel den Tangens zu bestimmen. Um die Form des Spannungsverlaufes festzulegen, genügt hierbei ein grobes Abschätzen dieser Werte, so daß man ohne jeden Rechnungsgang den jeweiligen Zusammenhang zwischen Strom und Spannung ermitteln kann.

Bisher haben wir nur die Zusammenhänge zwischen Strom und Spannung an einer Induktivität betrachtet. Sinngemäß lassen sich natürlich die gleichen Beziehungen für eine Kapazität ableiten. Der Zusammenhang zwischen Strom und Spannung an einer Kapazität ist gegeben durch: $U_C = Q/C = 1/C \cdot \int i \cdot \triangle t$. Dies bedeutet, daß die Spannung am Kondensator durch die Summierung des fließenden Stromes pro Zeiteinheit gebildet wird. Die Summierung pro Zeiteinheit wird in der Mathematik mit Integration bezeichnet. Analog hierzu hat man elektrische Schaltelemente mit gleicher Wirkung als integrierende Bauteile bezeichnet. Da man auf grafi-

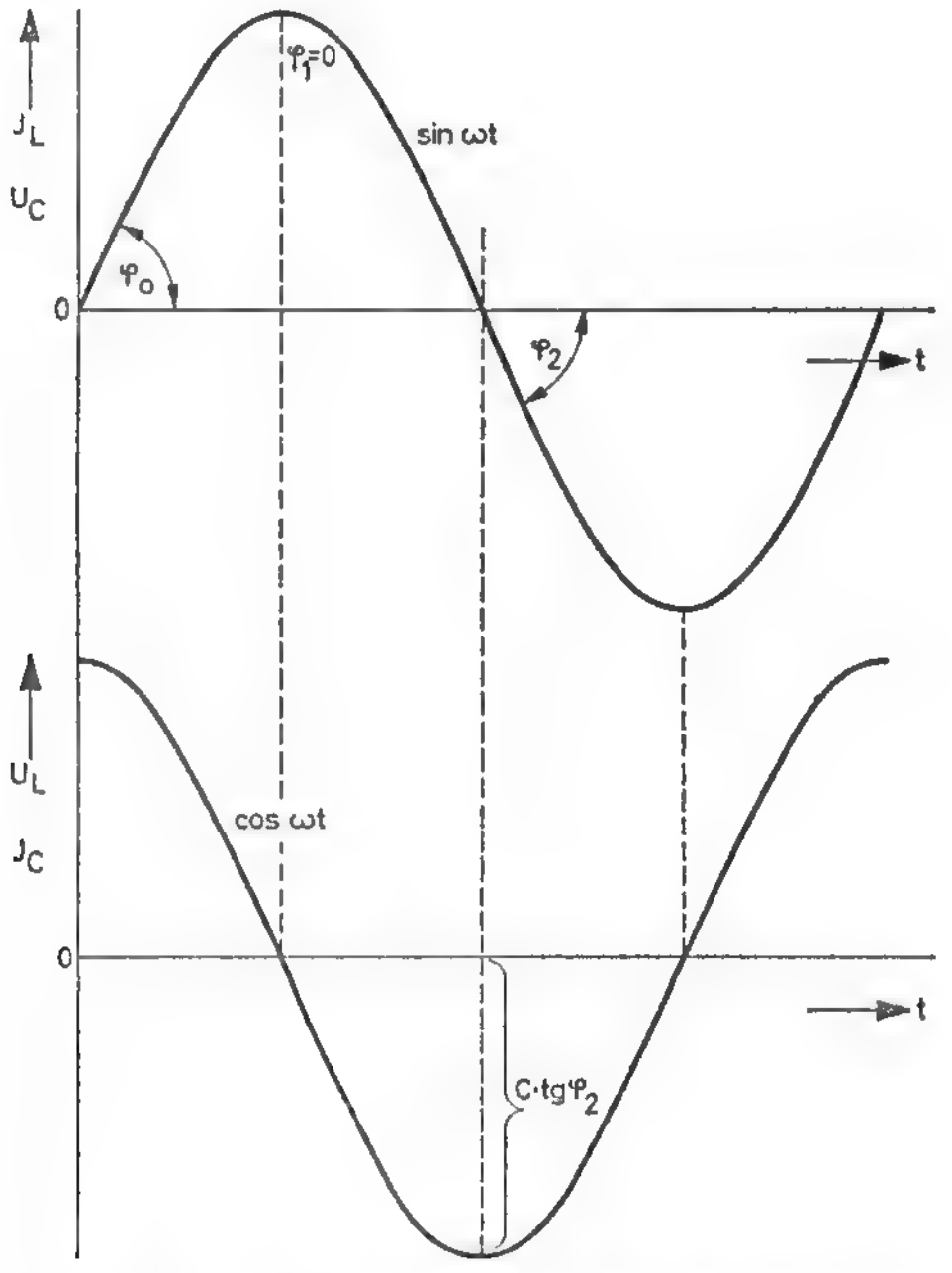


Abb. VIII. A. 5. Spannungs- und Stromverlauf bei sinusförmiger Änderung.

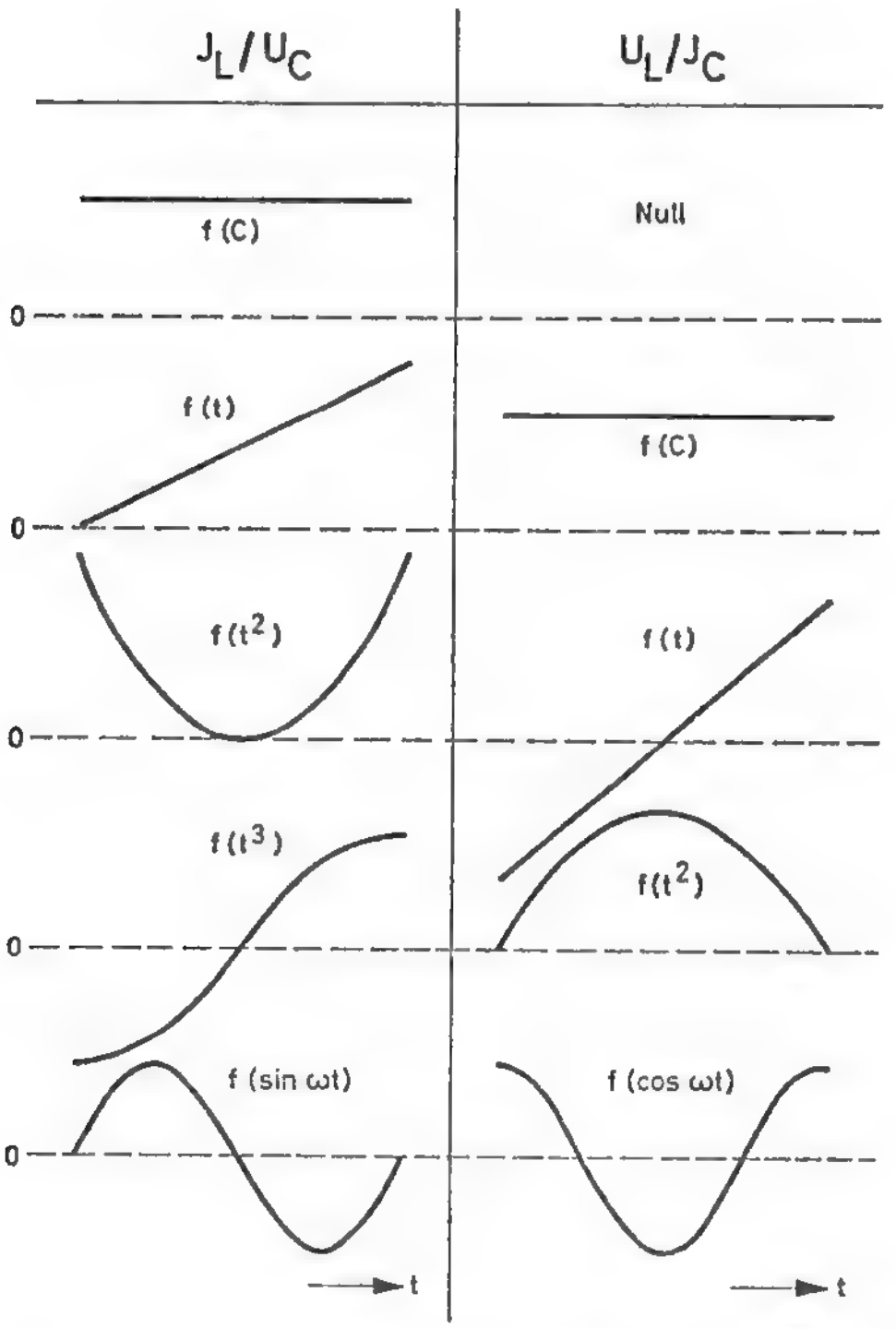


Abb. VIII. A. 6. Zusammenstellung verschiedener Strom- und Spannungsformen.

schem Wege eine Integration sehr viel schwieriger als die vorher beschriebene Differenzierung durchführen kann, formen wir die Ausgangsgleichung etwas um. Wird nämlich die Gleichung nach i umgestellt, so ergibt sich: $i = C \cdot \triangle U / \triangle t$. Anders ausgedrückt heißt dies, daß am Kondensator der Strom von der Spannungsänderung pro Zeiteinheit abhängig ist. Damit haben wir die gleiche Ausgangsform wie bei der Induktivität, nur daß jetzt Strom und Spannung ihre Positionen vertauscht haben. Wir können also aus bekannten Spannungsformen durch grafisches Differenzieren die durch den Kondensator fließenden Ströme bestimmen. Es gelten also die Abb. VIII. A. 1. bis VIII. A. 6. auch sinngemäß für den Spannungs- und Stromverlauf an Kapazitäten.

Zusammengefaßt sind in Abb. VIII. A. 6. für die fünf in der Praxis wichtigsten Fälle die Spannungs- und Stromformen an Induktivitäten und Kapazitäten gegenübergestellt.

KAPITEL IX

DER SYNCHRONGLEICHRICHTER

Übersicht

Zur Gleichrichtung eines Modulationsproduktes, bei dem senderseitig die Trägerschwingung unterdrückt wird, ist auf der Empfängerseite die Wiedereinführung dieser Trägerschwingung notwendig. Es muß hierbei die wiedereingeführte Trägerschwingung eine genau definierte Phasenbeziehung zur ursprünglichen Trägerschwingung des Senders haben. Aus einer normalen Diodengleichrichterschaltung abgeleitet erhält man die Grundform des Synchrongleichrichters als eine Zweidiodenschaltung. Daneben läßt sich ein Synchrongleichrichter in Form einer Mischröhrenschaltung oder aber mit einer sogenannten gesteuerten Gleichrichterstrecke aufbauen. An verschiedenen Beispielen wird gezeigt, daß die Phasenlage der wiedereingeführten Trägerschwingung von entscheidender Bedeutung für die Synchrongleichrichtung ist. Die Phasenlage der wiedereingeführten Trägerschwingung bestimmt nicht nur die Form und Amplitude der wiedergewonnenen NF, sondern macht es auch möglich, aus dem senderseitigen Farbartsignal U_F die darin enthaltenen beiden Farbdifferenzspannungen ohne gegenseitige Beeinflussung getrennt wiederzugewinnen. Es wird gezeigt, daß man mit zwei Synchrongleichrichtern sowohl die beiden Farbdifferenzspannungen $(U_R - U_Y)'$ und $(U_B - U_Y)'$ als auch U_I und U_Q wiedergewinnen kann. Benutzt man noch einen dritten Synchrongleichrichter, so kann man darüberhinaus die Farbdifferenzspannung $(U_G - U_Y)'$ direkt erhalten.

IX. 1. Gleichrichtung eines AM-Signals mit unterdrücktem Träger

Um die Arbeitsweise eines Synchrongleichrichters und seine typischen Eigenschaften und Besonderheiten kennen zu lernen, ist es zweckmäßig, sich zunächst noch einmal die normale AM-Gleichrichtung anzusehen. In der Abb. IX. 1. 1 ist deshalb für eine einfache Diodengleichrichtung ein amplitudenmoduliertes Trägersignal sowohl mit einer cosinusförmig verlaufenden NF als auch mit einer rechteckförmigen Modulation eingezeichnet. Für diese beiden Modulationen ist in Abb. IX. 1. 1a das normale Trägersignal, wie es bei jedem AM-Sender ausgestrahlt wird, nämlich die

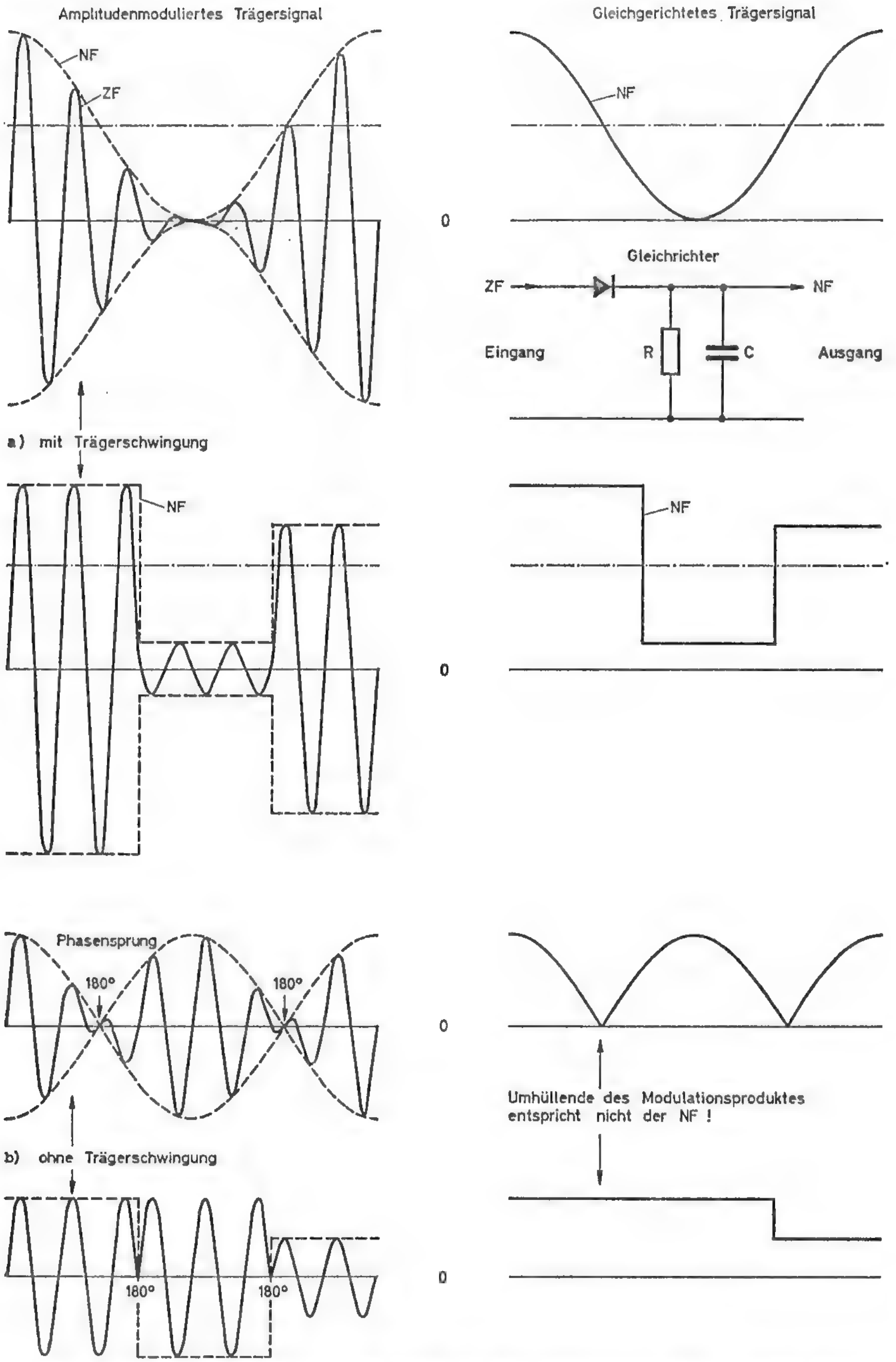


Abb. IX. 1. 1. Diodengleichrichtung eines amplitudenmodulierten Trägersignals.

Trägerfrequenz mit den beiden Seitenbändern als Modulationsprodukt, dargestellt. Daneben ist in Abb. XI. 1. 1b das für diese beiden gewählten Modulationen zugehörige Modulationsprodukt ohne die Trägerschwingung abgebildet. Man erkennt in Abb. IX. 1. 1b, daß der typische Phasensprung von 180° im Modulationsprodukt jedesmal dann auftritt, wenn die gedachte Umhüllende, die die Modulationsspannung darstellt, durch Null geht. Dieses Modulationsprodukt ohne die Trägerschwingung stellt unser Farbartsignal dar, wie wir es bereits in Kapitel V bei der Modulation mit unterdrücktem Träger kennengelernt hatten. Wird das amplitudenmodulierte Trägersignal der Abb. IX. 1. 1a der angedeuteten Diodengleichrichterschaltung zugeführt, dann wird bei entsprechend bemessener Zeitkonstante des Arbeitskreises der Diode am Arbeitswiderstand eine Richtspannung entstehen, die den positiven Spitzen der Trägerschwingung, also der Umhällenden des Trägersignals, folgt. Diese Umhüllende des Trägersignals entspricht der Modulationsspannung und damit der NF. Man erhält also in beiden Fällen, sowohl bei der cosinusförmigen Modulationsspannung als auch bei der rechteckförmigen Trägermodulation, durch die Diodengleichrichtung über die Umhüllende der Trägerschwingung die NF wieder. Führt man jetzt nur das Modulationsprodukt ohne die Trägerschwingung einer normalen Diodengleichrichterschaltung zu, so wird wiederum am Arbeitswiderstand dieses Gleichrichters die Richtspannung den Spitzen der Schwingung des Modulationsproduktes folgen. Diese Umhüllende des Modulationsproduktes ergibt aber eine Spannungsform, die nicht mehr der ursprünglichen Modulationsspannung gleicht. Bei der cosinusförmigen Modulationsspannung erhält man eine Richtspannung, die annährend der Grundschwingung mit doppelter Frequenz und sehr vielen Oberwellen entspricht. Bei der gewählten rechteckförmigen Modulation entsteht sogar eine Richtspannung, bei der der zweimalige Nulldurchgang der Modulationsspannung verschwindet. Aus dieser Darstellung wird in jedem Fall völlig klar, daß durch eine normale Diodenschaltung aus dem Modulationsprodukt die ursprüngliche Modulationsspannung nicht wiedergewonnen werden kann.

Deshalb muß man dazu übergehen, der Gleichrichterschaltung die beim Sender unterdrückte Trägerfrequenz wieder zuzuführen, damit aus der Summe des Modulationsproduktes und der Trägerschwingung die normale, ursprüngliche Form einer amplitudenmodulierten Trägerschwingung erhalten wird. Diese Notwendigkeit stellt das Wesentliche jedes Synchrongleichrichters dar. Es muß gleichzeitig mit dem Modulationsprodukt eine im Empfänger erzeugte Schwingung, die phasenstarr mit der ursprünglichen Schwingung des Farbträgers beim Sender verkoppelt sein muß, der Gleich-

richterschaltung zugeführt werden. In der Abb. IX. 1. 2. ist für ein 100% moduliertes Trägersignal das Modulationsprodukt mit cosinusförmiger NF dargestellt und in entsprechend richtiger Amplituden- und Phasenlage die dazugehörige Trägerschwingung. Addiert man dieses Modulationsprodukt und die entsprechende Trägerschwingung, so erhält man die Schwingungsform eines normalen, amplitudenmodulierten Trägers. Aus dieser Abbildung erkennt man, daß die positiven Spitzen der Trägerschwingung zeitlich mit den Punkten des Schwingungszuges des Modulationsproduktes zusammenfallen, deren Verbindung als gedachte Umhüllende die Modula-

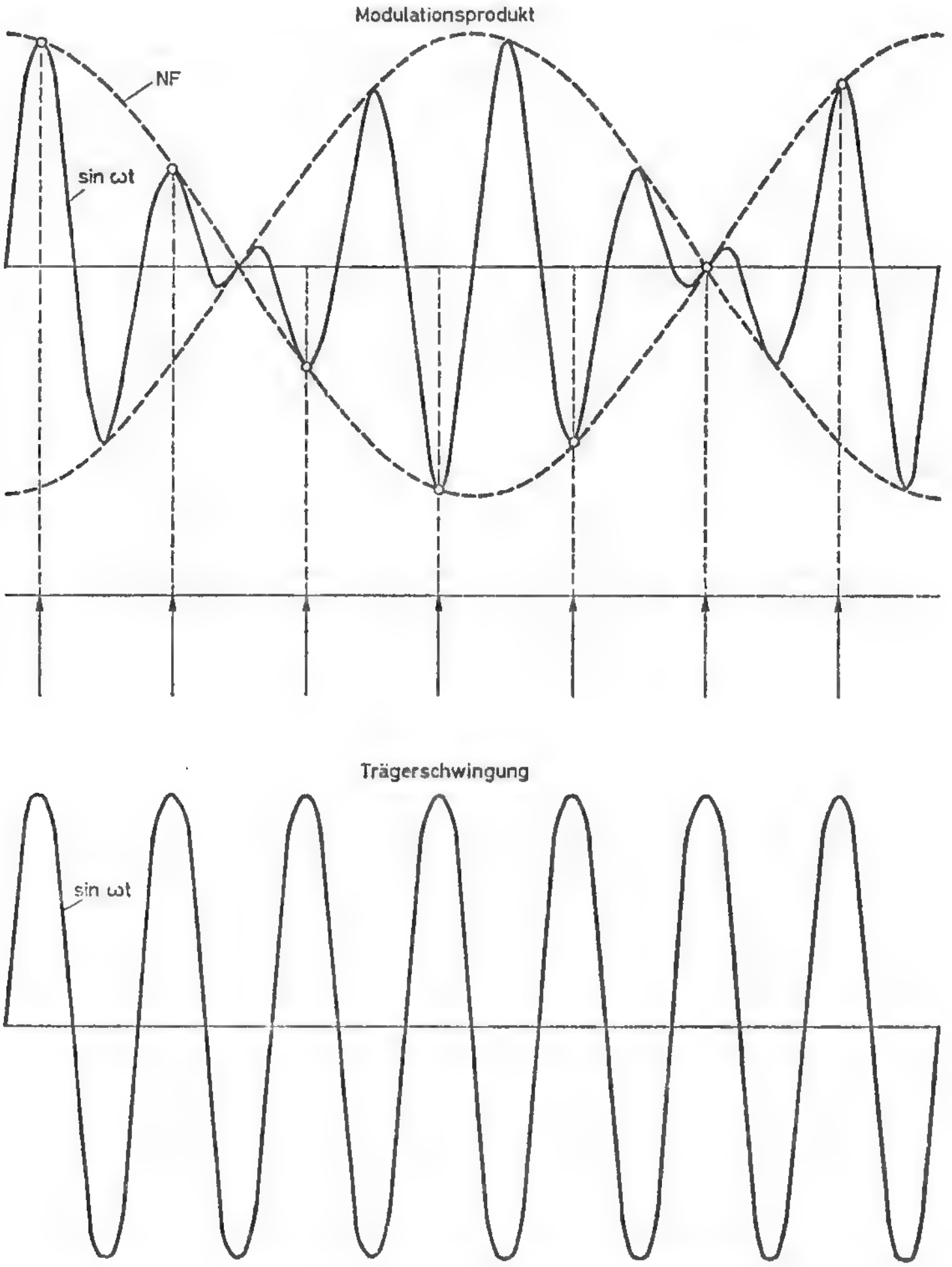


Abb. IX. 1. 2. Modulationsprodukt und Trägerschwingung.

tionsspannung, also die NF, wiedergibt. Dies ist bereits ein sehr wichtiger Punkt, der später bei der Erklärung des Synchrongleichrichters eine wesentliche Rolle spielen wird.

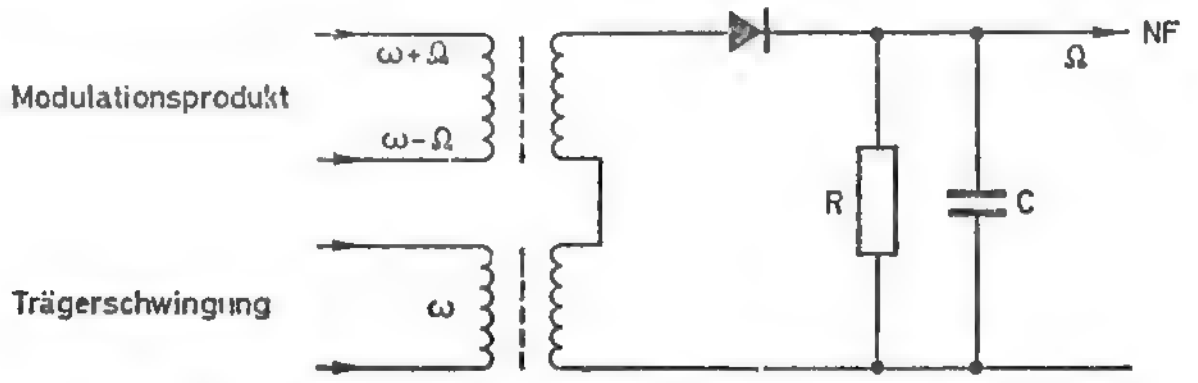


Abb. IX. 1. 3. Gleichrichtung des Modulationsproduktes durch Zuführung der Trägerschwingung.

Der einfachste Fall, um ein Modulationsprodukt so gleichzurichten, daß die entsprechende Modulationsspannung wiedererhalten wird, liegt dann vor, wenn man einer normalen Diodenschaltung gleichzeitig das Modulationsprodukt und die phasenrichtige Trägerschwingung zuführt. Dieses Grundprinzip ist in Abb. IX. 1. 3. dargestellt. Für die Gleichrichterdiode liegen das Modulationsprodukt und die Trägerschwingung in Serie und da die Summierung beider Signale der normalen amplitudenmodulierten Trägerschwingung entspricht, wird die Richtspannung am Ausgang der Umhüllenden der Summenschwingung entsprechen und damit die Form der Modulationsspannung haben. Um jedoch am Ausgang einer solchen Diodenschaltung die Modulationsspannung mit richtiger Polung und Phasenlage sowie mit dem richtigen Nullwert zu erhalten, muß man die Schaltung zu einer Zweidiodenschaltung erweitern. Dieses Grundprinzip ist in Abb. IX. 1. 4. angedeutet. Über einen Transformator, dessen Mittelanzapfung an Masse liegt, wird die Trägerschwingung gegenpolig über je ein RC-Glied zwei in Serie geschalteten Dioden zugeführt. Die Mitte beider Dioden liegt über einen hochohmigen Arbeitswiderstand an Masse und gleichzeitig wird diesem Punkt das Modulationsprodukt zugeführt. Die Zeitkonstanten der beiden RC-Glieder sind so gewählt, daß für die Trägerschwingung die Dioden als Spitzengleichrichter arbeiten und damit die Richtspannungen an den beiden Arbeitswiderständen der wechselspannungsmäßigen Spitzenspannung der Trägerschwingung entsprechen. Wenn nur die Trägerschwingung anwesend ist, sind also beide Dioden zur gleichen Zeit kurzzeitig geöffnet. Die Öffnungszeit fällt mit dem Spitzenwert der Trägerschwingung zusammen und es wird in dieser Zeit durch Nachladung der geringe Ladungsverlust der RC-Glieder ausgeglichen, der in den Sperrzeiten der Dioden durch die Entladung verlorengeht. Man kann diese

Gleichrichterschaltung auch so ansehen, daß von der Trägerschwingung her die beiden Dioden kurzzeitig aufgetastet werden und in der übrigen Zeit gesperrt sind. Während der Auftastung ist der Gleichrichterkreis sehr

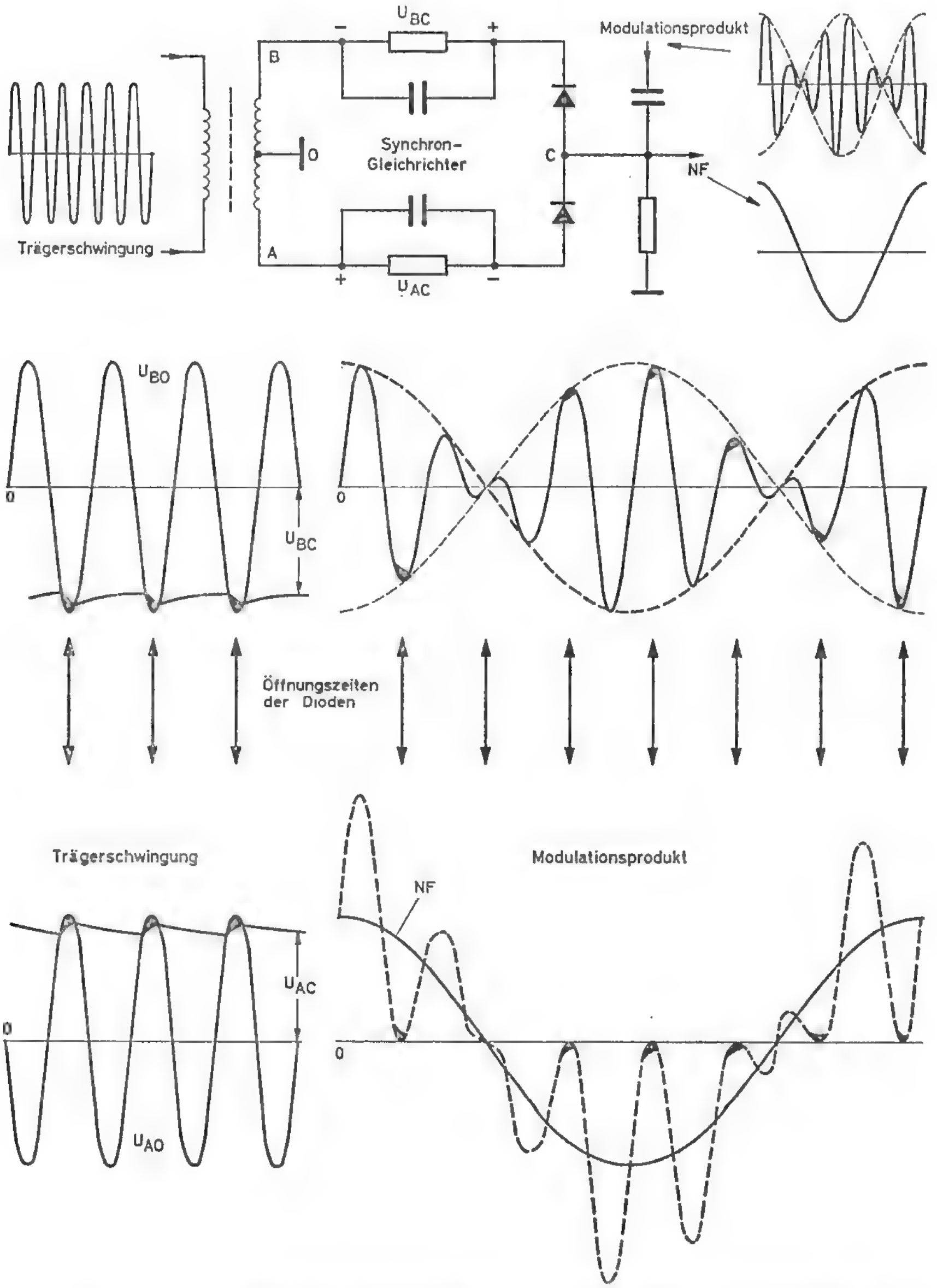


Abb. IX. 1. 4. Synchrongleichrichtung mit einer Zwei-Diodenschaltung.

niederohmig und der mit *C* bezeichnete Verbindungspunkt beider Dioden liegt damit, entsprechend der Mittelanzapfung des Eingangstransformators, auf Massepotential. Wird jetzt diesem Verbindungspunkt das Modulationsprodukt zugeführt, so kann nur während der Öffnungszeit der Dioden, proportional der angelegten Schwingungsamplitude des Modulationsproduktes, ein zusätzlicher Strom über die Diodenstrecke fließen. Entsprechend diesem Stromfluß wird sich also am Punkt *C* eine Richtspannung aufbauen. In unserem Beispiel der Abb. IX. 1. 4. liegen die Öffnungszeiten der Dioden so, daß während der schwarz eingezeichneten Kuppen des Schwingungszuges des Modulationsproduktes ein Strom durch die Gleichrichterschaltung fließt. Diese Spitzen des Schwingungszuges des Modulationsproduktes werden damit durch die Öffnung der Diodenstrecken auf Massepotential gehalten. Zeichnet man das Modulationsprodukt mit den Spitzen dieses Schwingungszuges auf Nullpotential, so sieht man sofort, daß die wechselspannungsmäßige Nullinie der gedachten Umhüllenden des Modulationsproduktes, also der Modulationsspannung, entspricht. Am Punkt *C* der Gleichrichterschaltung kann man also nach entsprechender Absiebung direkt die amplituden- und phasenrichtige Modulationsspannung abgreifen. Wichtig ist für die richtige Arbeitsweise zu erwähnen, daß die Trägerschwingung eine größere Amplitude als das Modulationsprodukt besitzen muß, damit nur die Trägerschwingung die kurzzeitige Auftastung der Diodenstrecken vornimmt und das Modulationsprodukt die Richtspannung am Punkt C bestimmt. Diese Anordnung einer Zweidiodenschaltung, die gegenphasig die Trägerschwingung zugeführt bekommt, wobei an dem Verbindungspunkt beider Dioden das Modulationsprodukt liegt, stellt die Grundform eines Synchrongleichrichters dar.

IX. 2. Synchrongleichrichtung durch Mischschaltungen

Das Grundprinzip des Synchrongleichrichters mit einer Zweidiodenschaltung wurde im vorigen Abschnitt erläutert. Da die Grundbedingung die gleichzeitige Anwesenheit des Modulationsproduktes und der Trägerschwingung ist, kann man auch eine Synchrongleichrichtung mit einer normalen Mischröhrenschaltung aufbauen. Dies ist in Abb. IX. 2. 1. angedeutet.

Benutzt man eine Röhre mit zwei herausgeführten Steuergittern, so kann man dem einen Steuergitter die Trägerschwingung und dem anderen Steuergitter das Modulationsprodukt zuführen. Da beide Steuergitter den Anodenstrom der Röhre durchsteuern, liegt bei Anwesenheit je einer Steuerspannung an den beiden Steuergittern im Anodenstrom der Röhre eine multiplikative Beeinflussung vor. Wie bei jeder Mischröhrenschaltung

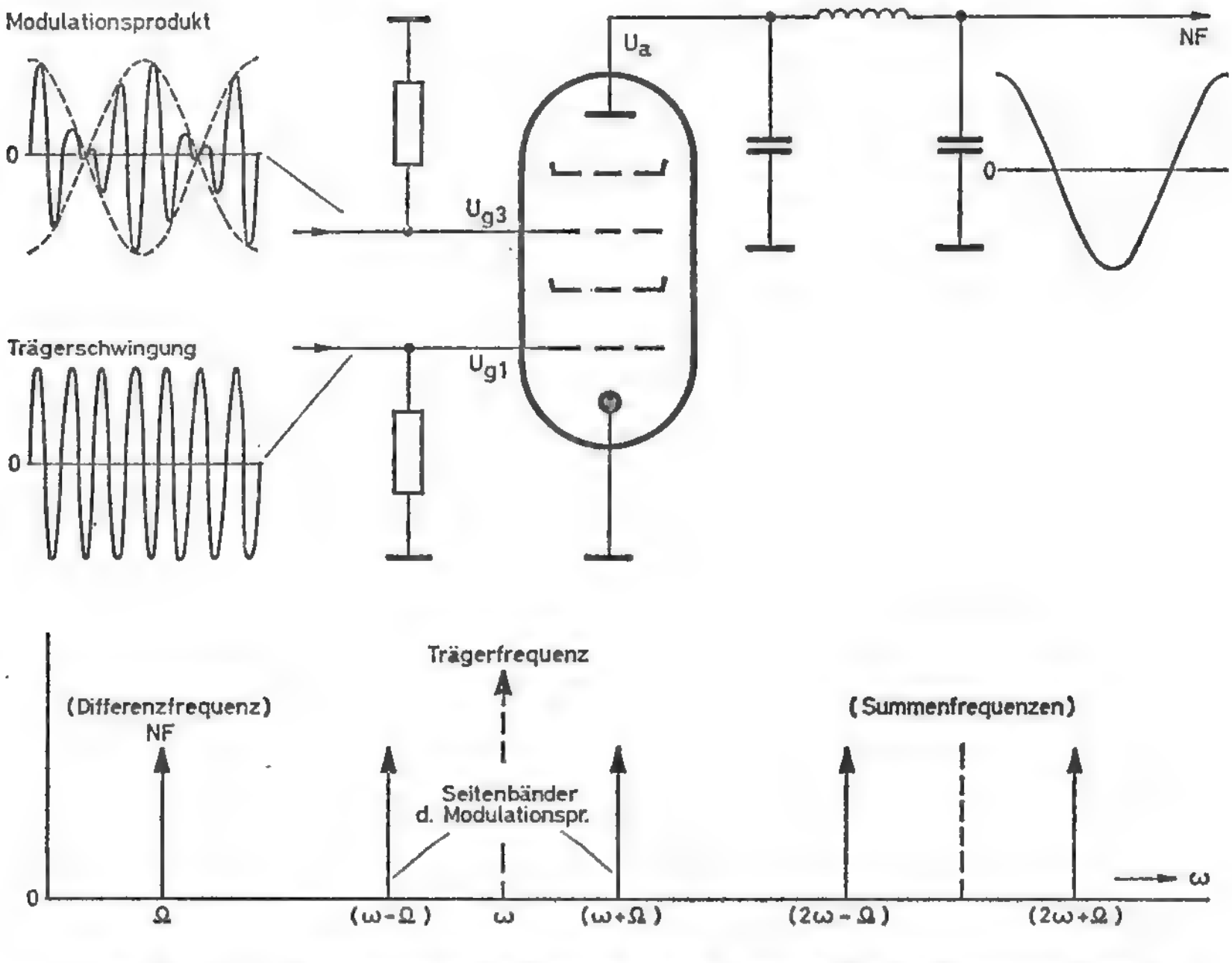


Abb. IX. 2. 1. Synchrongleichrichtung durch eine Mischröhrenschaltung.

wird man also im Anodenstrom der Röhre sowohl die Differenz- als auch die Summenfrequenzen der beiden Eingangssignale wiederfinden. Aus der Differenzfrequenz zwischen der Trägerschwingung und den beiden Seitenbändern des Modulationsproduktes ergibt sich die Modulationsspannung, also die NF.

Die Summenfrequenz aus Trägerschwingung und Seitenbändern besteht dabei aus der, um die Modulationsfrequenz versetzten, doppelten Trägerfrequenz. Ordnet man im Anodenkreis dieser Mischröhre ein Siebglied an, so kann man sowohl die Trägerfrequenz mit den Seitenbändern als auch die sich bildenden Summenfrequenzen absieben, so daß am Ausgang nur noch die Differenzfrequenz, also die ursprängliche NF aus dem Modulationsprodukt, vorhanden ist.

Eine dritte grundsätzliche Möglichkeit der Synchrongleichrichtung besteht darin, eine sogenannte gesteuerte Gleichrichterstrecke zu benutzen. Dieses Prinzip ist in Abb. IX. 2. 2. eingetragen.

Dem Steuergitter einer Triode wird die Trägerschwingung mit einer so großen Amplitude zugeführt, daß der Arbeitspunkt so weit im Negativen liegt, daß nur die positiven Spitzen der Trägerschwingung kurzzeitig die

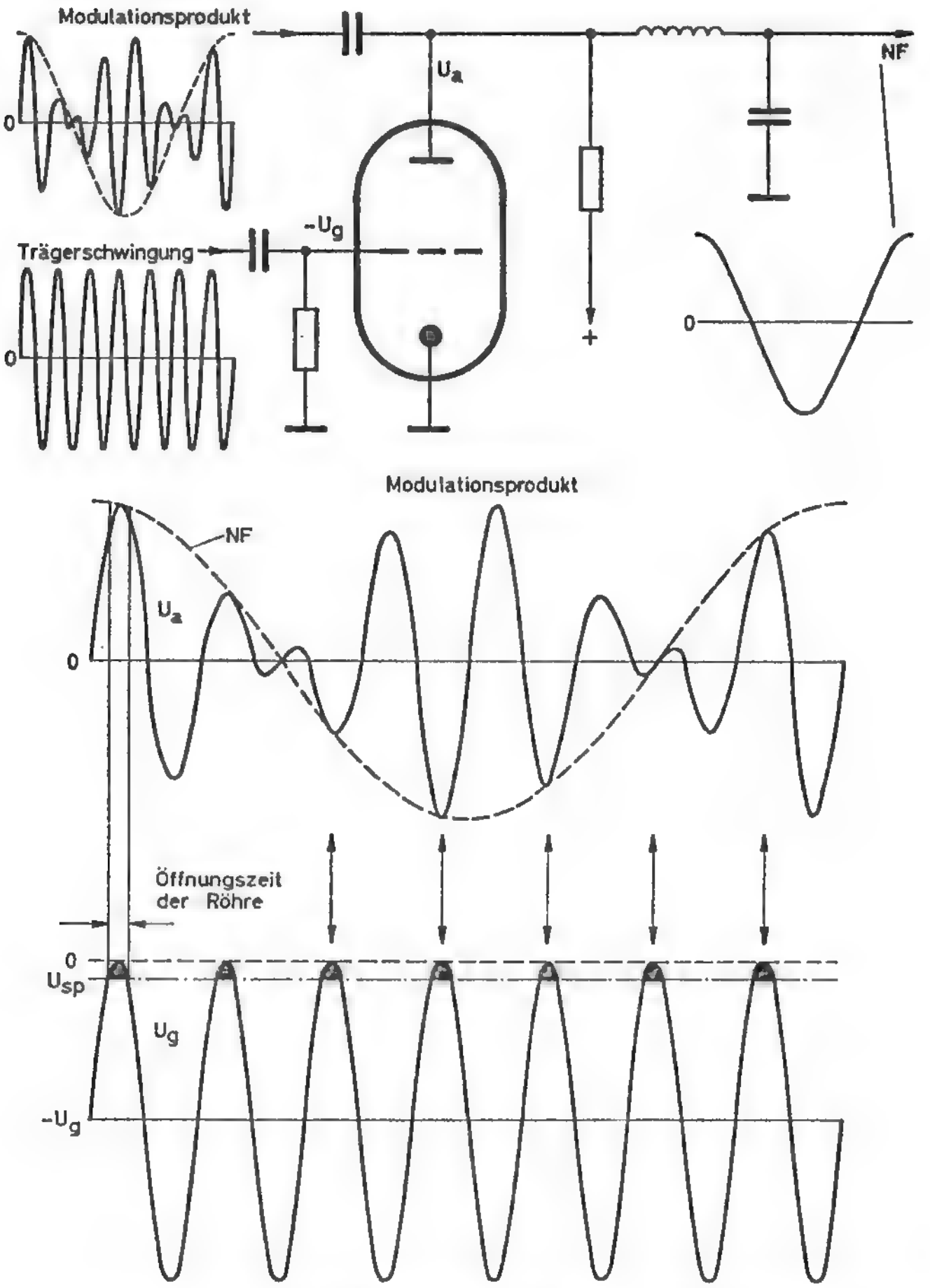


Abb. IX. 2. 2. Synchrongleichrichtung durch gesteuerte Gleichrichterstrecke.

Röhre öffnen können. Der Anode der Triode wird mit verhältnismäßig großer Amplitude das Modulationsprodukt, also das Farbartsignal U_F, zugeführt.

Ist im Amplitudenbereich des Modulationsproduktes der Innenwiderstand der Triode annähernd konstant, so bestimmt während der Öffnungszeit der Röhre die Amplitude des Modulationsproduktes den fließenden Anodenstrom und damit folgt nach entsprechender Absiebung die mittlere Anodenspannung der Modulationsspannung. Die Durchsteuerung einer Triode mit einer sehr großen Gitterwechselspannung ist in Abb. IX. 2. 3.

getrennt dargestellt, wobei die Anoden- und Gitterstrom-Kennlinie eingezeichnet ist. Der Sperrpunkt des Anodenstromes ist mit U_{sp} bezeichnet. Die positiven Spitzen der Gitterwechselspannung rufen dabei einen starken Gitterstrom hervor, der am Gitterableitwiderstand eine so große negative Spannung aufbaut, daß der Arbeitspunkt weit ins Negative verschoben wird, während die Spitzen der Gitterwechselspannung auf der Nullinie festgehalten werden. Die Gitterwechselspannung kann also nur im Bereich

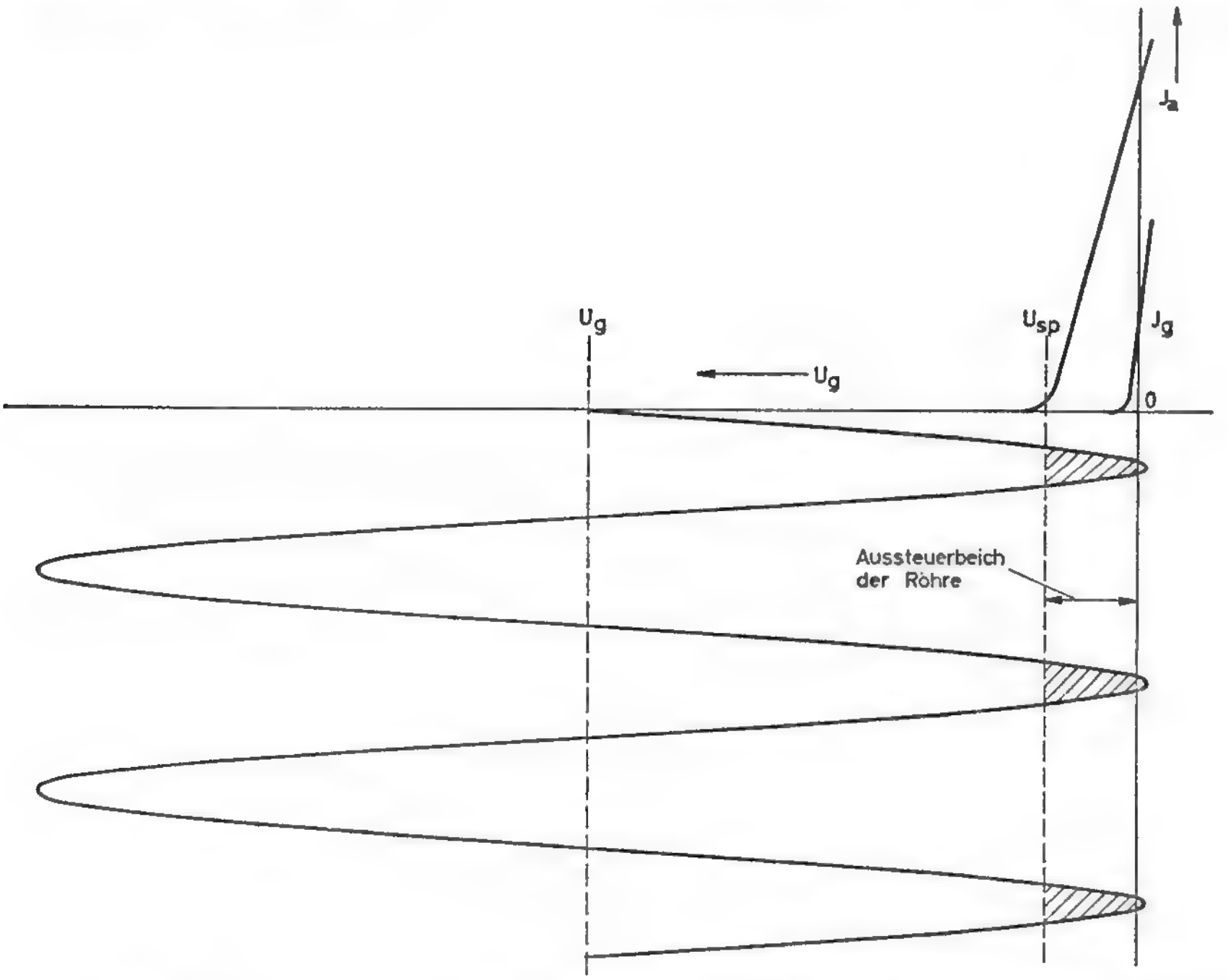


Abb. IX. 2. 3. I_a — U_g-Kennlinie einer mit großer Gitterwechselspannung angesteuerten Triode.

zwischen Null und dem Sperrspannungswert U_{sp} die Röhre durchsteuern. In den dazwischenliegenden Perioden ist die Röhre stark negativ gesperrt. Auch bei diesem Prinzip erkennen wir, daß die Trägerschwingung mit ihren Spitzenwerten eine Schalterfunktion ausübt, genauso wie bei der im vorigen Abschnitt beschriebenen Zweidiodenschaltung, und daß die Amplitude des Modulationsproduktes bei der Auftastung der Röhre den Stromfluß und damit die Richtspannung am Ausgang bestimmt.

IX. 3. Einfluß der Phasenlage des wiedereingeführten Trägers

Bei der Synchrongleichrichtung sowohl durch die Zweidiodenschaltung als

auch durch die gesteuerte Gleichrichterstrecke konnte man erkennen, daß für die Wiedergewinnung der Modulationsspannung die Auftastung durch die Spitzen der Trägerschwingung von entscheidender Bedeutung ist. Man

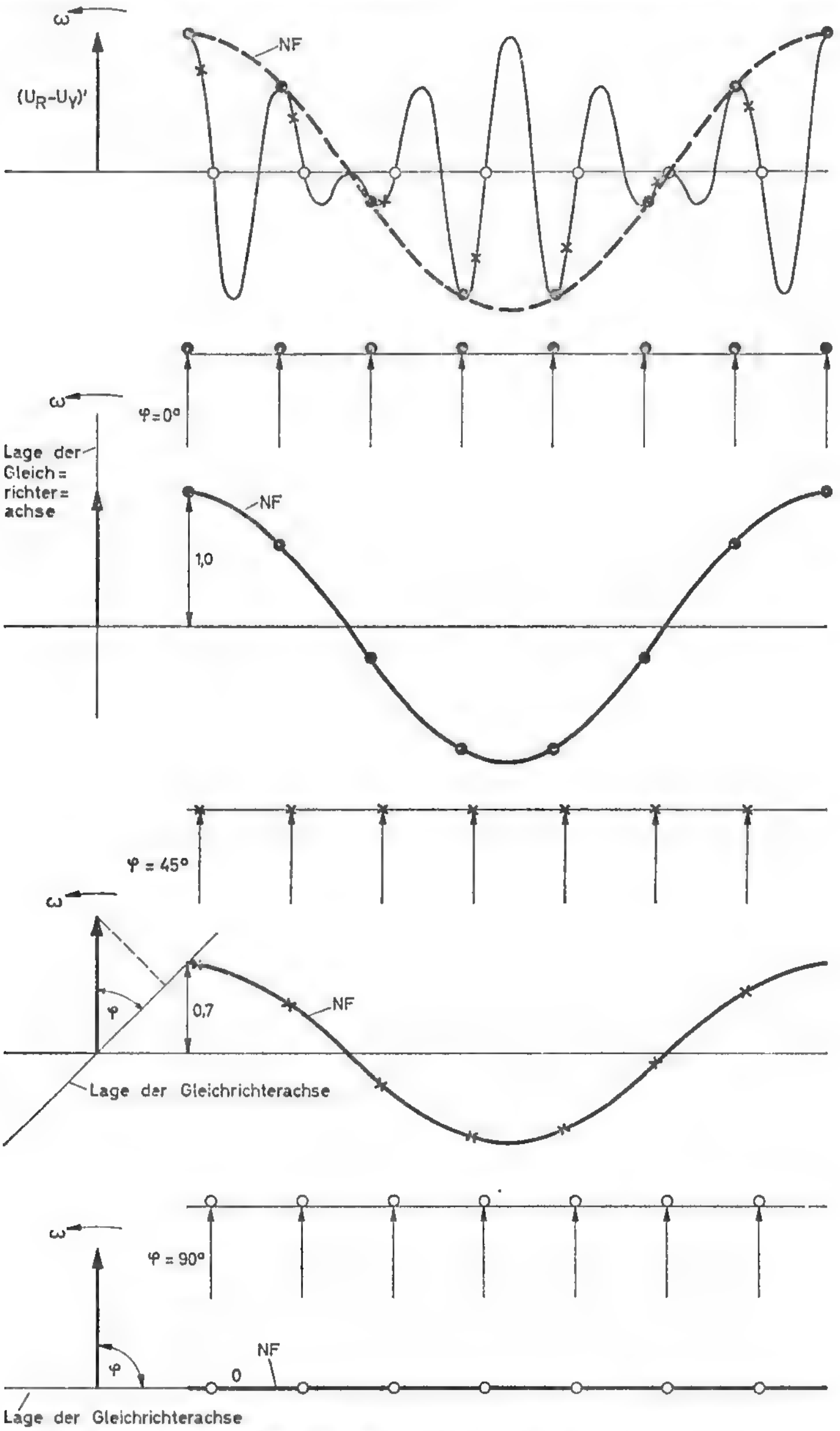


Abb. IX. 3. 1. Einfluß der Phasenlage der Synchrongleichrichterachse auf die wiedergewonnene Modulationsspannung.

kann sich deshalb jede Synchrongleichrichterschaltung in ihrer Grundfunktion so vorstellen, daß die wiedereingeführte Trägerschwingung mit ihren Spitzenamplituden eine Gleichrichterschaltung auftastet und die zu diesen Zeitpunkten herrschende Amplitude des Modulationsproduktes bestimmt die Größe der entstehenden NF. Bei diesem Grundprinzip wird jedoch sofort klar, daß die Phasenlage der Trägerschwingung von entscheidender Bedeutung für die Form und Größe der wiedergewonnenen NF ist. Um dies deutlicher zu machen, sollen nachfolgend für verschiedene Phasenlagen der wiedereingeführten Trägerschwingung die gewonnenen NF-Spannungen betrachtet werden. Am zweckmäßigsten wählen wir hierzu als Modulationsprodukt eine Farbartspannung, die zunächst nur aus der Farbdifferenzspannung $(U_R - U_Y)'$ besteht.

In der Abb. IX. 3. 1. ist deshalb die Farbdifferenzspannung $(U_R - U_Y)'$ cosinusförmig moduliert als Modulationsprodukt dargestellt.

Wird jetzt einem Synchrongleichrichter die Farbträgerspannung so zugeführt, daß sie phasengleich mit dem Schwingungszug des Modulationsproduktes ist, so wird jeweils von den Spitzen der zugeführten Trägerschwingung das Modulationsprodukt an der gedachten Umhüllenden aufgetastet. Die Verbindung dieser Punkte stellt die Modulationsspannung, also die NF, dar. Wird dagegen die Trägerschwingung um 45° zum Modulationsprodukt phasenverschoben dem Synchrongleichrichter zugeführt, so findet die Auftastung an Punkten des Modulationsproduktes statt, die miteinander verbunden zwar auch noch cosinusförmigen Charakter haben, aber nur noch die 0,7-fache Amplitude aufweisen. Bei einer Phasenverschiebung der Trägerschwingung von 90° gegenüber der Farbdifferenzspannung $(U_R - U_Y)'$ findet die Auftastung des Modulationsproduktes jeweils im Nulldurchgang statt, und die Ausgangsspannung des Synchron-

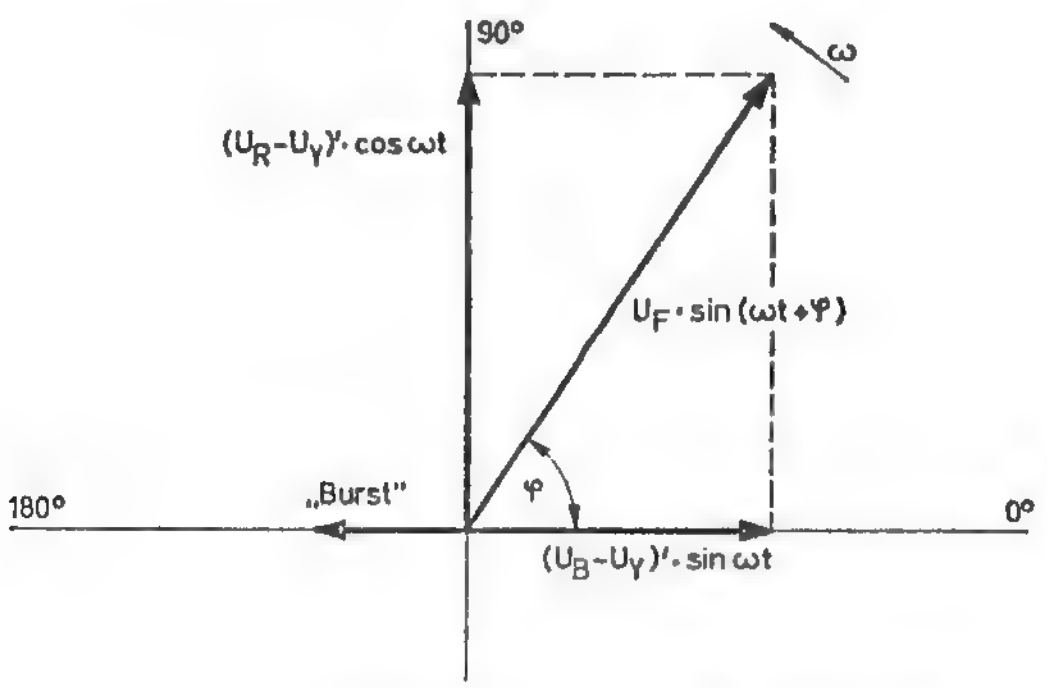


Abb. IX. 3. 2. Vektorlage der Farbartspannung U_F.

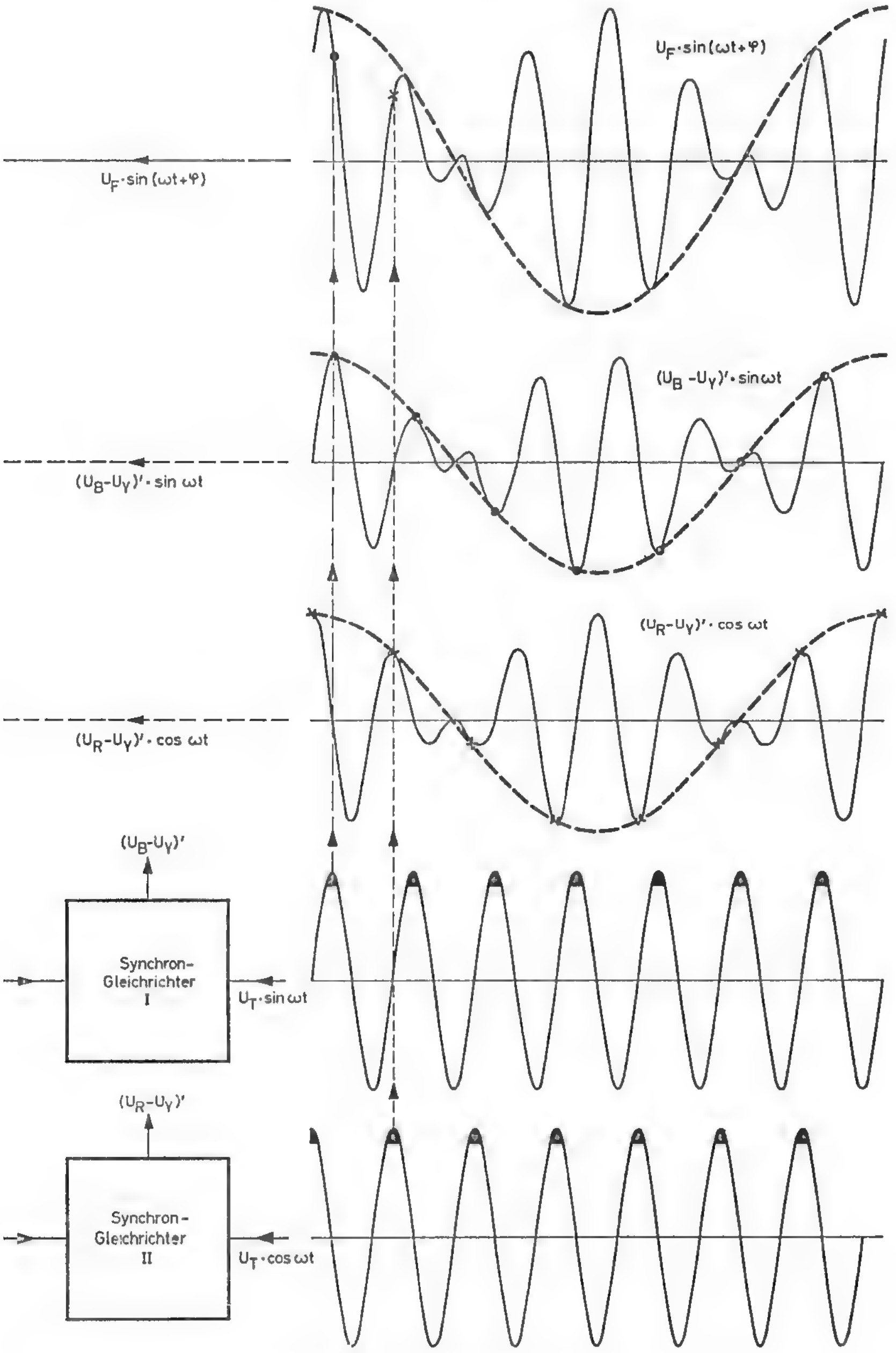
gleichrichters ist Null. Dieser letzte Fall ist äußerst wichtig, da durch diese Tatsache die beiden Farbdifferenzspannungen $(U_B - U_Y)'$ und $(U_R - U_Y)'$ unbeeinflußt voneinander in zwei getrennten Synchrongleichrichtern wiedergewonnen werden können, weil zwischen beiden Farbdifferenzspannungen 90° Phasenverschiebung besteht und eine Trägerschwingung, die 90° Phasendifferenz zum Modulationsprodukt aufweist, keine Ausgangsspannung am Synchrongleichrichter liefern kann.

In Abb. IX. 3. 2. ist die bereits in Kapitel V erklärte Zusammensetzung des Farbartmodulationsvektors U_F aus den beiden Teilkomponenten der Farbdifferenzspannungen noch einmal dargestellt.

Die Farbdifferenzspannung $(U_B - U_Y)'$ ist phasenmäßig als Ausgangspunkt mit 0° definiert und in der üblichen Darstellungsweise in links drehendem Sinn erscheint um 90° voreilend die Farbdifferenzspannung $(U_R - U_Y)'$.

Beide Teilkomponenten rechtwinklig addiert, ergeben die sich im Zweiphasenmodulator bildende Farbartspannung U_F. Die Bezugsphase des Farbsynchronsignals des Senders, der sogenannte „Burst", liegt in Gegenphase zur $(U_B - U_Y)'$-Spannung, also bei 180°. Um also beide Farbdifferenzspannungen unabhängig voneinander wieder zu erhalten, muß man das Farbartsignal $U_F \cdot \sin(\omega t + \varphi)$ zwei getrennten Synchrongleichrichtern zuführen. Obgleich damit an jedem Synchrongleichrichter die Summierung beider Farbdifferenzspannungen liegt, ist die einwandfreie Trennung dadurch möglich, daß z.B. der Synchrongleichrichter, der die Trägerschwingung in der Phasenlage sin ωt zugeführt bekommt, die Farbdifferenzspannung $(U_R - U_Y)'$ immer nur im Nulldurchgang des Schwingungszuges auftastet, so daß diese Spannung kein Ausgangssignal liefern kann und nur die $(U_B - U_Y)'$-Komponente die sich bildende NF bestimmt. Beim zweiten Synchrongleichrichter ist es umgekehrt, hier wird durch die zugeführte Trägerschwingung in der Phasenlage cos ωt die Farbdifferenzspannung $(U_B - U_Y)'$ immer nur im Nulldurchgang der Schwingungszüge aufgetastet und die $(U_R - U_Y)'$-Komponente kann allein die sich bildende NF bestimmen. In der Abb. IX. 3. 3. ist diese Trennungsmöglichkeit beider Farbdifferenzspannungen, durch die gegenseitige Phasenlage von 90° zueinander, vereinfacht dargestellt.

Ohne die Aufzeichnung der Schwingungszüge selbst kann man die sich bildende NF in Synchrongleichrichterschaltungen auch in der Vektordarstellung ablesen. Hierbei liegt die Gleichrichterachse in der Phasenlage der zugeführten Trägerschwingung. Es kann hierfür die Abb. IX. 3. 2. herangezogen werden, in der die Teilkomponenten $(U_B - U_Y)'$ und $(U_R - U_Y)'$ als Vektoren der Farbartspannung U_F eingezeichnet sind. Für den Syn-



)b. IX. 3. 3. Auftrennung der Farbartspannung $U_F \sin(\omega t + \varphi)$ in die Farbdiffe-ızspannungen $(U_B - U_Y)'$ und $(U_R - U_Y)'$ durch phasenrichtige Synchrongleich-richtung.

chrongleichrichter mit der zugeführten Trägerschwingung in der Phasenlage sin ωt liegt die Gleichrichterachse in der Richtung $(U_B - U_Y)'$ und es gilt für die NF-Ausgangsspannung die Projektion der Farbartspannung auf dieser Achse. Die Farbdifferenzspannung $(U_R - U_Y)'$ liefert also auf der $(U_B - U_Y)'$-Achse keine Spannung, genauso wie umgekehrt die Farbdifferenzspannung $(U_B - U_Y)'$ auf der $(U_R - U_Y)'$-Achse keine Spannung erzeugen kann.

Um die Trennung beider Farbdifferenzspannungen auch bei verschiedenen Modulationsspannungen deutlicher zu machen, ist in Abb. IX. 3.4. für die Farbdifferenzspannung $(U_R - U_Y)'$ eine cosinusförmige Modulationsspannung und für die Farbdifferenzspannung $(U_B - U_Y)'$ eine rechteckförmige Modulationsspannung gewählt. Summiert man beide Farbdifferenzspannungen zur Farbartspannung U_F, so ergibt sich ein Gesamtschwingungszug, der vom Sender als Farbartmodulationsprodukt ausgestrahlt wird. Dieses Farbartmodulationssignal muß jetzt im Farbempfänger in zwei Synchrongleichrichterschaltungen so gleichgerichtet werden, daß der Ausgang des einen Synchrongleichrichters die ursprüngliche Farbdifferenzspannung $(U_R - U_Y)'$ und der andere Synchrongleichrichter die Farbdifferenzspannung $(U_B - U_Y)'$ liefert. Um dies zu erreichen, muß der eine Synchrongleichrichter eine Trägerschwingung in der Phasenlage sin ωt für die Farbdifferenzspannung $(U_B - U_Y)'$ und der andere Synchrongleichrichter eine Trägerschwingung in der Phasenlage cos ωt für die Farbdifferenzspannung $(U_R - U_Y)'$ erhalten. Durch Pfeile für diese Phasenlagen cos ωt bzw. sin ωt ist die Auftastung der Farbartspannung U_F in der Abb. IX. 3. 4. markiert. Die Verbindung dieser Auftastpunkte liefert am Ausgang der beiden Synchrongleichrichter jeweils die ursprüngliche Modulationsspannung. Es ist also von der Phasenlage der wiedereingeführten Trägerschwingung abhängig, welche Form und Amplitude die NF besitzt, die mit einer Synchrongleichrichterschaltung gewonnen wird und zum anderen können zwei völlig verschiedene und unabhängige Modulationsspannungen im Farbartsignal U_F vorhanden sein und ohne gegenseitige Beeinflussung nach entsprechender Synchrongleichrichtung wiedergewonnen werden. Die Abhängigkeit der Synchrongleichrichtung von der Phasenlage des wiedereingeführten Trägers soll noch an einem weiteren Beispiel verständlicher gemacht werden. Als Modulationsspannung wählen wir dafür eine konstante Farbspannung „Rot".

Für die Synchrongleichrichtung der drei Farbdifferenzspannungen sind hierfür in Abb. IX. 3. 5. die einzelnen Phasenlagen und Amplituden eingetragen.

In Kapitel III wurde erklärt, daß bei der Farbspannung „Rot"

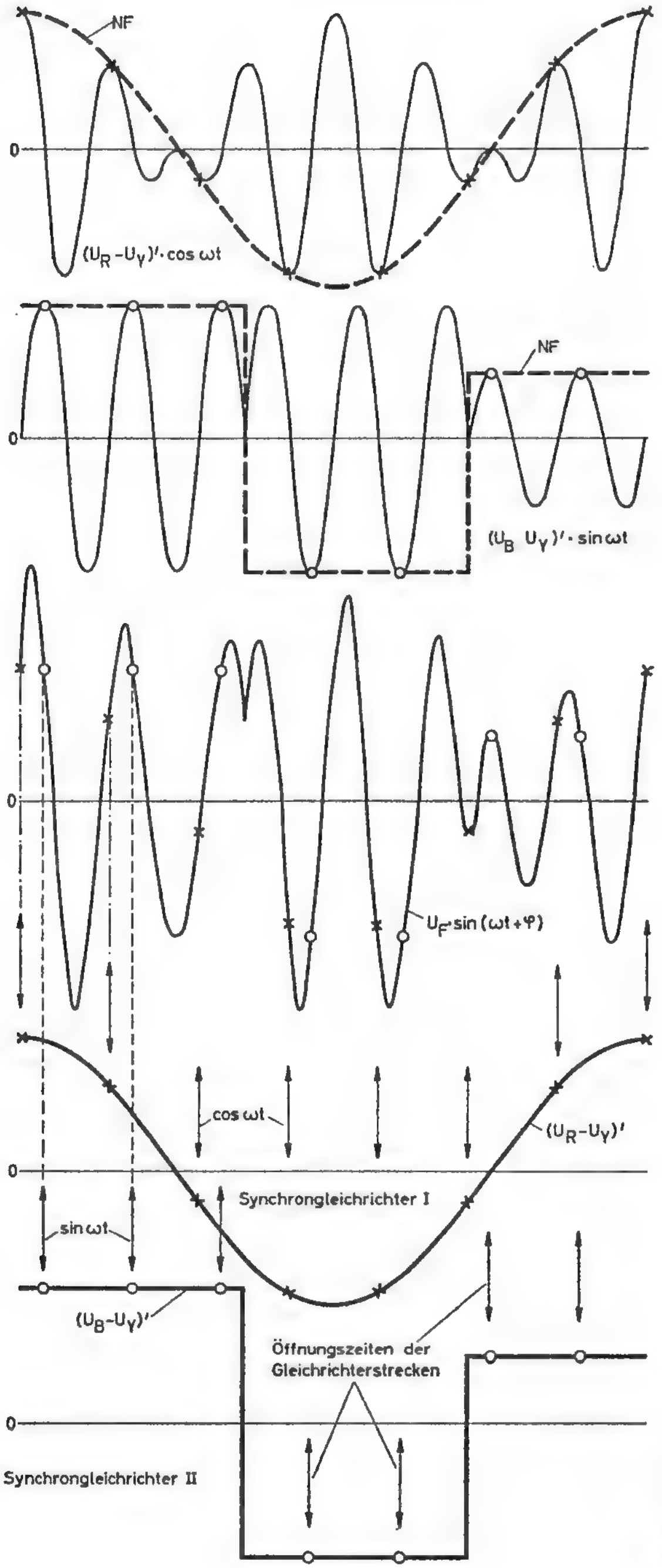


Abb. IX. 3. 4. Rückgewinnung der Farbdifferenzsignale $(U_R - U_Y)'$ *und* $(U_B - U_Y)'$ durch phasenrichtige Synchrongleichrichtung.

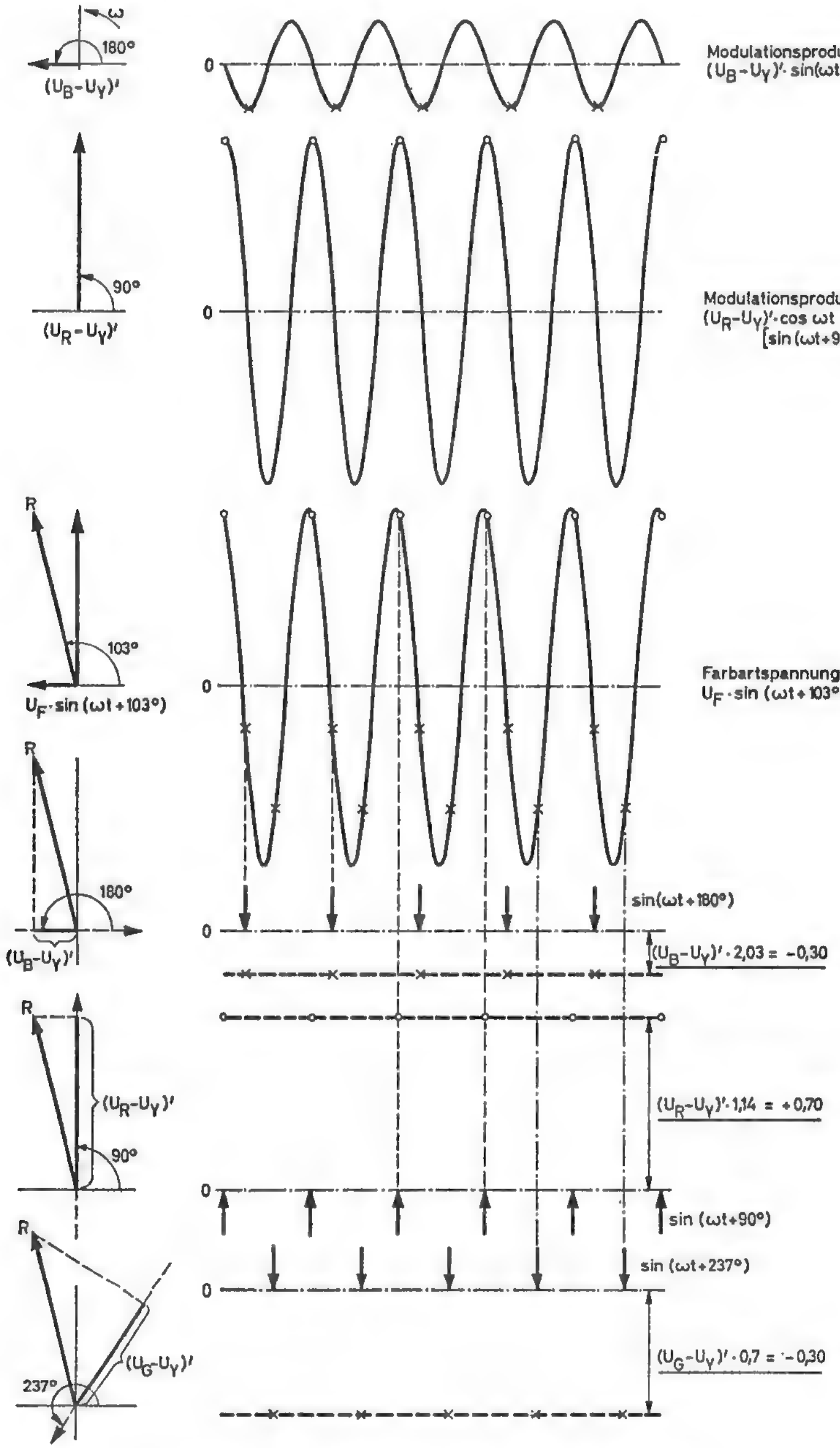


Abb. IX. 3. 5. Prinzip der Synchrongleichrichtung für die Farbspannung Rot auf den Modulationsachsen: $(U_B - U_Y)'$, $(U_R - U_Y)'$ und $(U_G - U_Y)'$.

die reduzierte Modulationsamplitude für die Farbdifferenzspannung $(U_B - U_Y)' = -0{,}15$ beträgt und die entsprechende Amplitude für die Farbdifferenzspannung $(U_R - U_Y)' = 0{,}62$ ist. Die Modulationsamplitude der Farbdifferenzspannung $(U_B - U_Y)'$ hat vektoriell dargestellt eine Phasenlage von 180°, und die Farbdifferenzspannung $(U_R - U_Y)'$ die Phasenlage von 90°. Beide Modulationsamplituden der Farbdifferenzsignale vektoriell addiert ergeben die Amplitude der Farbartspannung „Rot" von $\sqrt{(-0{,}15^2) + (0{,}62)^2} = \pm 0{,}63$ bei einer Phasenlage von 103°. Diese Farbartspannung U_F wird vom Sender bei roter Bildvorlage als Modulationsprodukt ausgestrahlt. Wird jetzt eine Synchrongleichrichtung im Empfänger in der Art vorgenommen, daß die wiedereingeführte Trägerspannung eine Phasenlage von sin ωt hat, so wird die Farbartspannung U_F an den Punkten aufgetastet, die als Verbindungslinie eine Amplitude ergibt, die der ursprünglichen Senderspannung $(U_B - U_Y)'$ von $-0{,}15$ entspricht. Um von dieser reduzierten Modulationsamplitude auf die ursprüngliche Farbdifferenzspannung $(U_B - U_Y)$ zu kommen, muß dieser Wert mit 1/0,49, also mit 2,03 multipliziert werden. Dies ergibt den ursprünglich vorhandenen Wert des Farbdifferenzsignals bei roter Farbe von $U_B - U_Y = -0{,}30$.

Liegt die Phasenlage der zugeführten Trägerschwingung so, daß sie mit sin $(\omega t + 90°)$ vorgenommen wird, so liegt die Auftastung der Farbartspannung U_F an den Stellen, bei denen die Verbindungslinie der Amplitude 0,62 für die erforderliche Farbdifferenzspannung $(U_R - U_Y)'$ hat. Um auch hier den ursprünglichen Wert des Farbdifferenzsignals $(U_R - U_Y)$ zu erhalten, muß diese reduzierte Modulationsamplitude mit $1/0{,}88 = 1{,}14$ multipliziert werden. Man erhält dann den Wert für $U_R - U_Y = 0{,}70$. Soll daneben über einen dritten Synchrongleichrichter die Farbdifferenzspannung $(U_G - U_Y)'$ direkt gewonnen werden, so muß die Zuführung der Trägerschwingung in der Phasenlage sin $(\omega t + 237°)$ erfolgen. Die Auftastung bei der Phasenlage sin $(\omega t + 237°)$ erfolgt so, daß ein Wert von $-0{,}43$ erhalten wird. Dieser Wert muß mit $1/1{,}4 = 0{,}7$ multipliziert werden, so daß wir auch hier die richtige Farbdifferenzspannung erhalten. Die Zusammensetzung der Amplitudenwerte und die Phasenlage der Farbdifferenzachse $(U_G - U_Y)'$ wurde im Kapitel III näher erläutert und definiert. Die drei erwähnten Faktoren 2,03 : 1,14 und 0,7 zur Rückgewinnung der Werte der ursprünglichen Farbdifferenzspannungen müssen nach der Synchrongleichrichtung in der nachfolgenden Matrix und Verstärkerschaltung berücksichtigt werden. Aus allen Beispielen erkennt man deutlich, daß die Wirkungsweise eines Synchrongleichrichters durch phasenrichtiges Auftasten der Farbartspannung U_F erklärt werden kann und zum

anderen in einer Vektordarstellung die Gleichrichteramplitude sofort durch die Projektion der Farbartspannung auf die gewählte Gleichrichterachse abzulesen ist.

Zusammengefaßt soll jetzt noch einmal in Form von einfachen Blockschaltbildern das Prinzip des Synchrongleichrichters und die mögliche Wahl der Phasenlage des wiedereingeführten Trägers für die Gewinnung der Farbdifferenzspannungen angegeben werden. Wenn, wie in

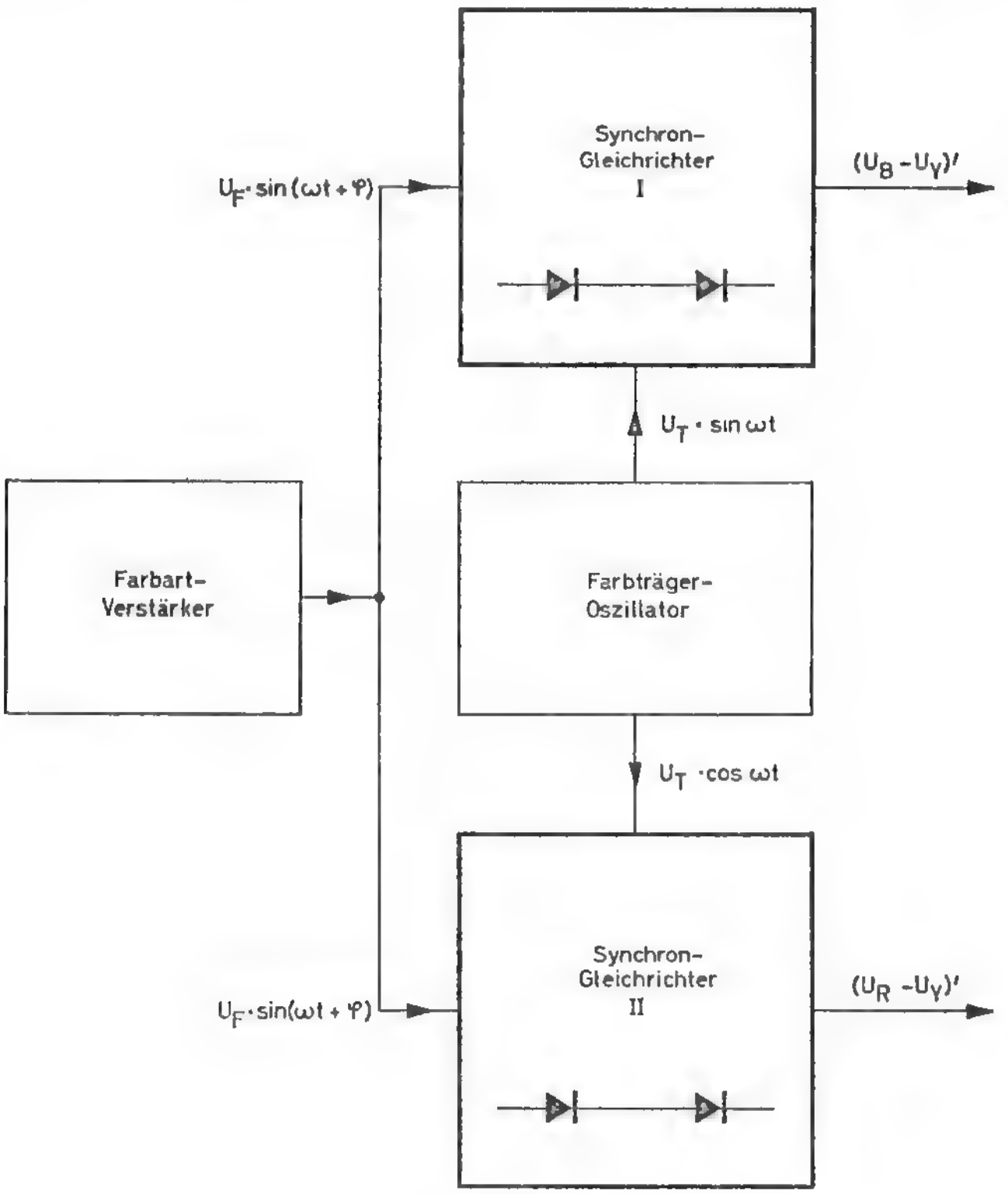


Abb. IX. 3. 6. Synchrongleichrichtung auf den Modulationsachsen $(U_R - U_Y)'$ und $(U_B - U_Y)'$.

Abb. IX. 3. 6. dargestellt, die Farbdifferenzspannungen $(U_R - U_Y)'$ und $(U_B - U_Y)'$ durch je einen Synchrongleichrichter direkt aus dem Farbartsignal U_F gewonnen werden sollen, so müssen den Synchrongleichrichtern neben dem Farbartsignal U_F des Senders von einem Farbträgeroszillator je eine Trägerschwingung in der Phasenlage sin ωt bzw. cos ωt zugeführt werden. Will man dagegen die optimal mögliche Farbauflösung

voll ausnutzen und die beiden Farbdifferenzspannungen U_Q und U_I vom Synchrongleichrichter erhalten, so muß die Farbträgerschwingung in der Phasenlage sin (ωt + 33°) bzw. cos (ωt + 33°) den Synchrongleichrichtern zugeführt werden. Dies ist in Abb. IX. 3. 7. dargestellt.

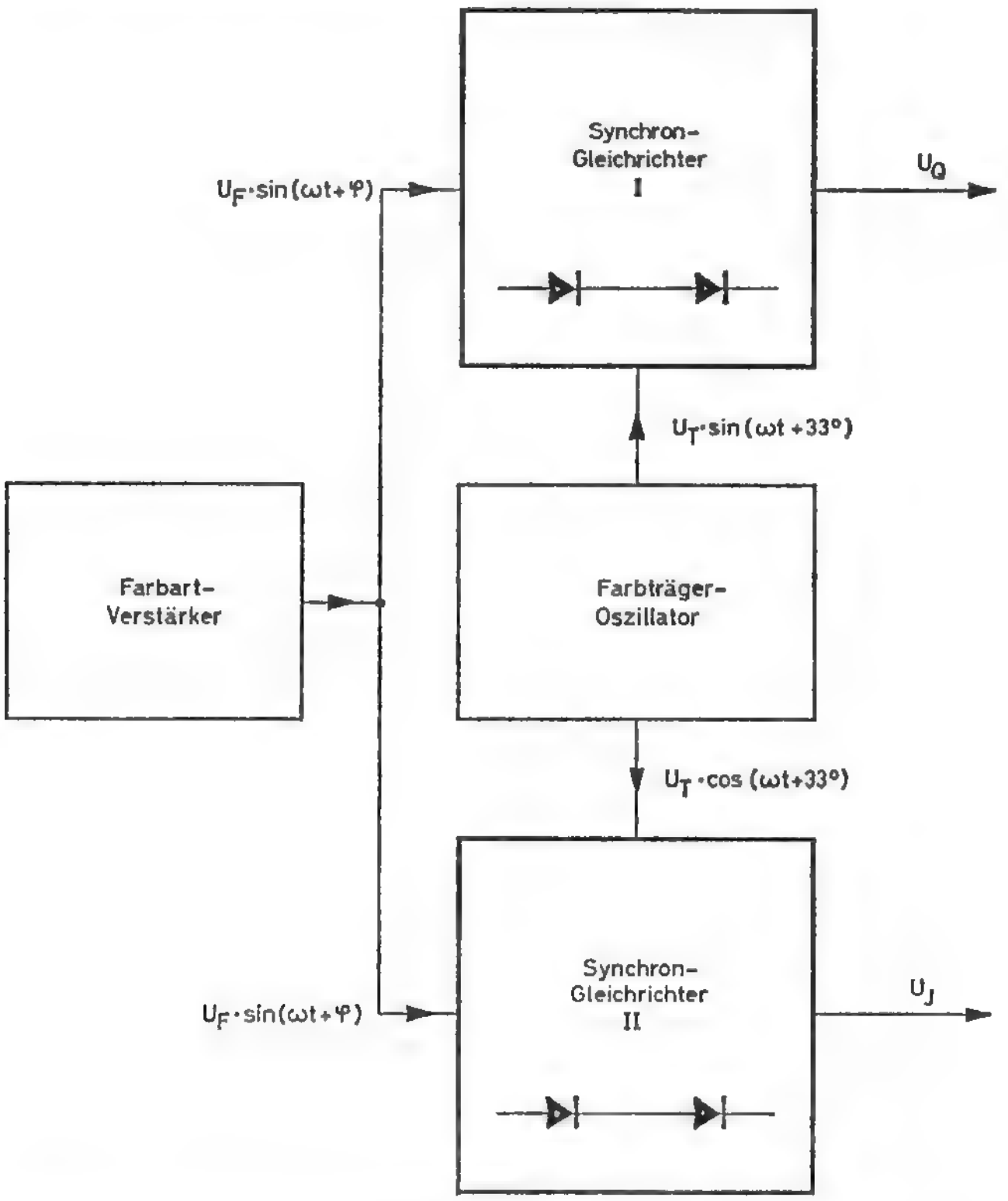


Abb. IX. 3. 7. Synchrongleichrichtung auf den Modulationsachsen U_I und U_Q.

Will man durch drei verschiedene Synchrongleichrichter alle drei Farbdifferenzspannungen, nämlich $(U_B - U_Y)'$, $(U_R - U_Y)'$ und $(U_G - U_Y)'$ direkt gewinnen, so müssen, wie in Abb. IX. 3. 8. angegeben, die drei Synchrongleichrichter die Farbträgerschwingungen in den Phasenlagen sin ωt, cos ωt und sin (ωt + 237°) erhalten. Darüberhinaus gibt es noch eine weitere Möglichkeit zwei Gleichrichterachsen für die Gleichrichtung des Farbartsignals phasenmäßig so zu wählen, daß nachfolgend in der erforderlichen Matrixschaltung mit einem minimalen Aufwand gearbeitet werden kann. Diese spezielle Gleichrichtung soll in den wesentlichen Grundzügen

jedoch erst im nächsten Kapitel bei der Behandlung der Matrixschaltung näher erklärt werden, da hierbei besonders deutlich wird, daß zwischen Synchrongleichrichter und nachfolgender Matrixstufe eine sehr enge Wechselbeziehung besteht.

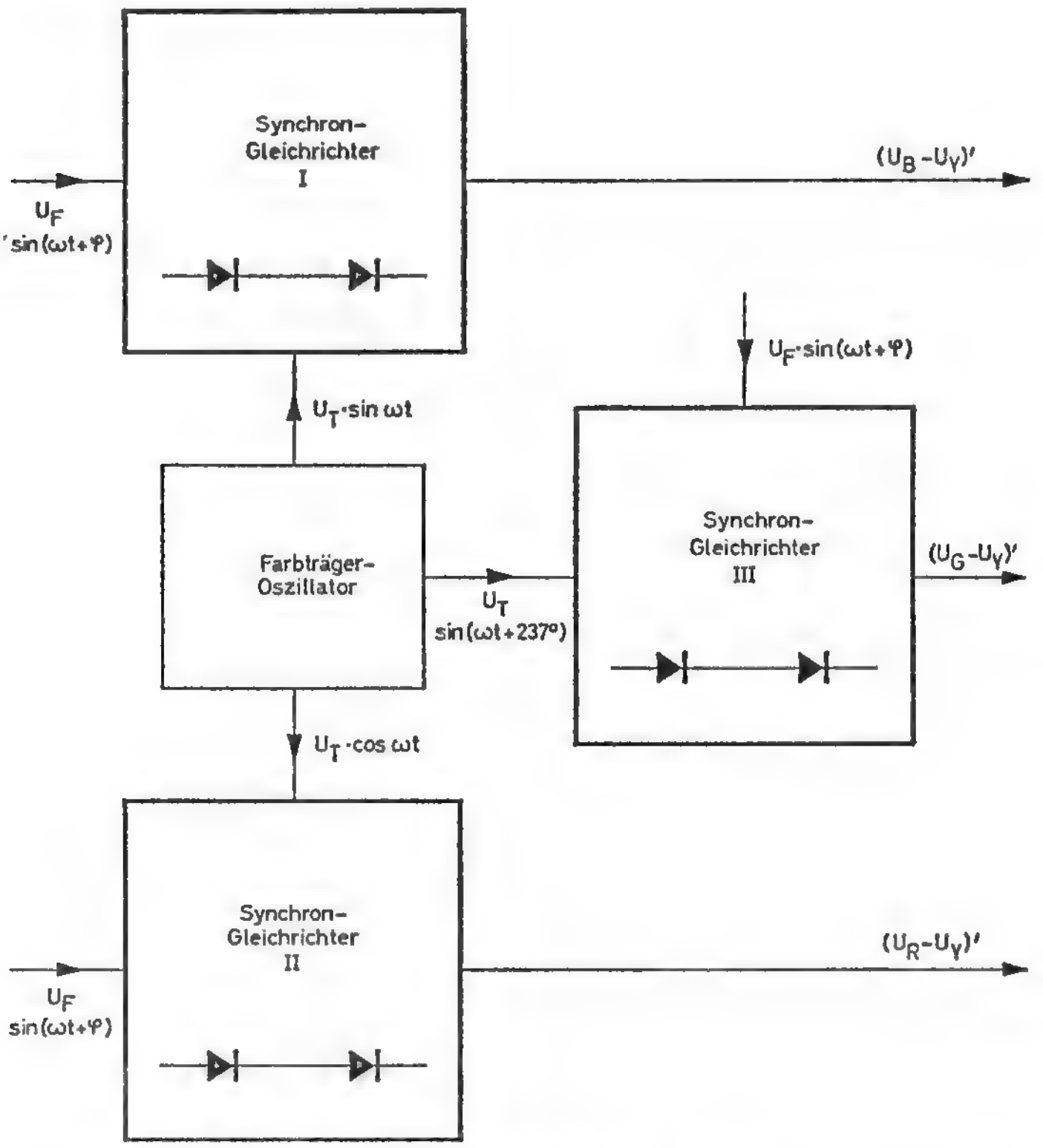


Abb. IX. 3. 8. Synchrongleichrichtung auf den Modulationsachsen $U_R - U_Y$; $U_B - U_Y$ und $U_G - U_Y$.

Zusammenfassung

Führt man einer normalen Diodengleichrichterschaltung ein Modulationsprodukt zu, bei dem senderseitig die Trägerschwingung unterdrückt wird, so erkennt man, daß das gleichgerichtete Signal nicht mit der ursprünglichen Modulationsspannung übereinstimmt. Zur Wiedergewinnung dieser Modulationsspannung ist es daher erforderlich, empfängerseitig die Trägerschwingung wieder zuzuführen.

Durch die Erweiterung einer normalen Diodengleichrichterschaltung kommt man zur Grundform des Synchrongleichrichters in Form einer

Zweidiodenschaltung. Neben dieser Zweidiodenschaltung kann man für die Synchrongleichrichtung sowohl eine Mischröhrenanordnung als auch das Prinzip der gesteuerten Gleichrichterstrecke benutzen. Bei allen drei Schaltungsvarianten läßt sich die Arbeitsweise des Synchrongleichrichters am einfachsten dadurch erklären, daß diese Schaltungen von der im Empfänger wiedereingeführten Trägerschwingung kurzzeitig aufgetastet werden und die während dieser Zeit vorhandene Amplitude des senderseitigen Modulationsproduktes die Ausgangsamplitude und somit die wiedergewonnene NF bestimmt. Hierbei ist es von entscheidender Bedeutung, daß die wiedereingeführte Trägerschwingung eine genau definierte Phasenbeziehung zur ursprünglich beim Sender vorhandenen Trägerschwingung hat. Die starke Abhängigkeit der Synchrongleichrichterschaltungen von der Phasenlage der wiedereingeführten Trägerschwingung hat nicht nur zur Folge, daß die NF-Ausgangsspannung in ihrer Form und Amplitude hiervon maßgebend bestimmt wird, sondern schafft auch die Möglichkeit, die beiden Farbdifferenzspannungen der Farbartmodulation getrennt voneinander wiederzugewinnen. Durch Wahl der Phasenlage der eingeführten Trägerschwingung kann man Synchrongleichrichterschaltungen aufbauen, mit denen man entweder direkt die Farbdifferenzspannungen $(U_R - U_Y)'$ und $(U_B - U_Y)'$ bzw. U_I und U_Q erhalten kann.

Darüberhinaus kann man mit einem dritten Synchrongleichrichter direkt die Farbdifferenzspannung $(U_G - U_Y)'$ wiedergewinnen. Welche Schaltungsart und welcher Aufbau des Synchrongleichrichters in praktischen Empfängerschaltungen benutzt wird, hängt unmittelbar mit dem Aufbau der nachfolgenden Matrix zusammen. Wie im nächsten Kapitel gezeigt wird, bilden Synchrongleichrichter und Matrix eine Einheit, da beide Schaltungsgruppen sich gegenseitig beeinflussen und damit direkt voneinander abhängig sind.

KAPITEL X

MATRIXSCHALTUNGEN

Übersicht

Die Grundfunktion jeder Matrixschaltung besteht darin, aus den beiden vom Synchrongleichrichter gewonnenen Farbspannungen, die für die Ansteuerung der Dreifarben-Lochmaskenröhre benötigten Farbdifferenzspannungen $U_R - U_Y$, $U_G - U_Y$ und $U_B - U_Y$ zu bilden. Hierzu ist es erforderlich, daß in der Matrix, unabhängig von dem allgemeinen Verstärkungsgrad, die richtigen, relativen Amplitudenverhältnisse zwischen diesen drei Farbdifferenzspannungen hergestellt werden. In welcher Form dies geschehen kann, hängt davon ab, welche Farbspannungen vom Synchrongleichrichter der Matrixschaltung zugeführt werden. Die Matrixschaltung kann damit nicht unabhängig aufgebaut werden, sondern bildet zusammen mit dem Synchrongleichrichter eine Einheit. Die gebräuchlisten im Farbempfänger vorkommenden Schaltungen weisen dabei folgende Merkmale auf:

a. Von drei Synchrongleichrichtern werden der Matrix die Farbdifferenzspannungen $(U_R - U_Y)'$, $(U_B - U_Y)'$ und $(U_G - U_Y)'$ zugeführt.
b. Die Synchrongleichrichter liefern die beiden Farbdifferenzspannungen $(U_R - U_Y)'$ und $(U_B - U_Y)'$.
c. Es werden von den Synchrongleichrichtern die beiden Farbdifferenzspannungen U_I und U_Q gewonnen.
d. Durch besondere Wahl der Gleichrichterachsen werden vom Synchrongleichrichter zwei Farbspannungen U_A und U_B geliefert, die nachfolgend einen minimalen Aufwand in der Matrix zur Folge haben.

Der letzte Fall macht besonders deutlich, daß zwischen dem Synchrongleichrichter und der Matrixschaltung eine sehr enge Wechselbeziehung besteht und die Farbdifferenzspannungen von beiden Schaltungsgruppen in gleich starkem Maße beeinflußt werden können.

X. 1. Matrix für Farbdifferenz-Gleichrichtung

Unabhängig von der Art der vom Synchrongleichrichter gewonnenen Farbspannung muß jede Matrixschaltung so aufgebaut sein, daß ihre Ausgangsspannungen den drei Farbdifferenzspannungen $U_R - U_Y$, $U_G - U_Y$

und U_B — U_Y entsprechen. Diese Grundfunktion ist in Abb. X. 1.1 dargestellt. Man erkennt das Ansteuerungsschema der Dreifarben-Lochmaskenröhre, wonach die drei Katoden das Leuchtdichtesignal — U_Y erhalten und an den drei Steuergittern jeweils eine der Farbdifferenzspannungen U_R — U_Y, U_G — U_Y und U_B — U_Y liegt. Die Amplituden dieser drei Farbdifferenzspannungen müssen den Spannungen, wie sie beim Sender hinter der Farbkamera vorhanden waren, entsprechen, es sind also die beim Sender gebildeten, unreduzierten Farbdifferenzspannungen.

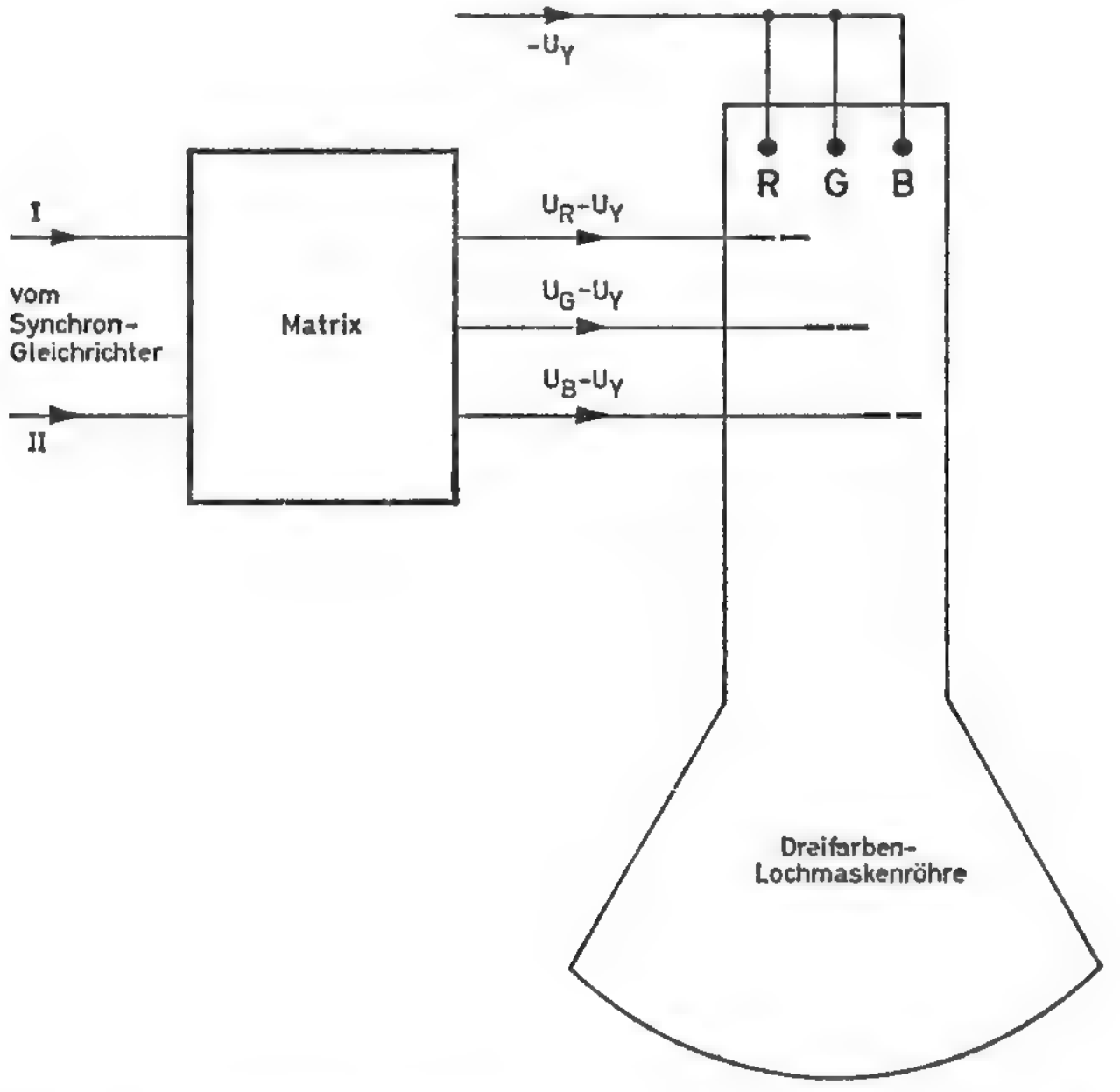


Abb. X. 1. 1. Grundfunktion der Matrix. Umwandlung der Signale vom Synchrongleichrichter in die Farbdifferenzspannungen $(U_R — U_Y)'$; $(U_G — U_Y)'$ und $(U_B — U_Y)'$.

Dies bedeutet, daß die relativen Amplitudenverhältnisse für die Farbdifferenzspannungen, genauso wie bereits in Kapitel III ausgeführt, folgende Werte haben müssen:

$$U_R — U_Y = +0{,}70\, U_R — 0{,}59\, U_G — 0{,}11\, U_B$$

$$U_G — U_Y = —0{,}30\, U_R + 0{,}41\, U_G — 0{,}11\, U_B$$

$$U_B — U_Y = —0{,}30\, U_R — 0{,}59\, U_G + 0{,}89\, U_B.$$

Die einfachste Form einer Matrixschaltung wird zweifellos dann erhalten,

wenn von drei getrennten Synchrongleichrichtern die drei Farbdifferenzspannungen $(U_R - U_Y)'$, $(U_B - U_Y)'$ und $(U_G - U_Y)'$ gewonnen werden. In diesem Fall muß die Matrixschaltung nur dafür sorgen, daß die relativen Amplituden der unreduzierten Farbdifferenzspannungen für die Ansteuerung der Bildröhre zur Verfügung stehen. Die Werte für die benötigten relativen Amplitudengrößen, und damit für die relativen Verstärkungsfaktoren der Matrixschaltung, betragen für $U_R - U_Y = 1{,}14$ (1/0,88), für $U_B - U_Y = 2{,}03$ (1/0,49) und für $U_G - U_Y = 0{,}7$ (1/1,43).

Werden dagegen von zwei Synchrongleichrichterschaltungen die Farbdifferenzspannungen $(U_R - U_Y)'$ und $(U_B - U_Y)'$ geliefert, so muß in einer Matrixstufe aus diesen Amplitudengrößen die dritte Farbdifferenzspannung $(U_G - U_Y)'$ gebildet werden. Hierfür ist in der Abb. X. 1. 2. zunächst noch einmal angedeutet, wie sich die Farbdifferenzspannung $U_G - U_Y$ aus jeweils einem Anteil der Farbdifferenzspannung $(U_B - U_Y)'$ und $(U_R - U_Y)'$ zusammensetzt. Addiert man vektoriell —0,38 $(U_B - U_Y)'$ und —0,58 $(U_R - U_Y)'$, so erhält man mit richtiger Amplitude und Phasenlage die Farbdifferenzspannung $U_G - U_Y$.

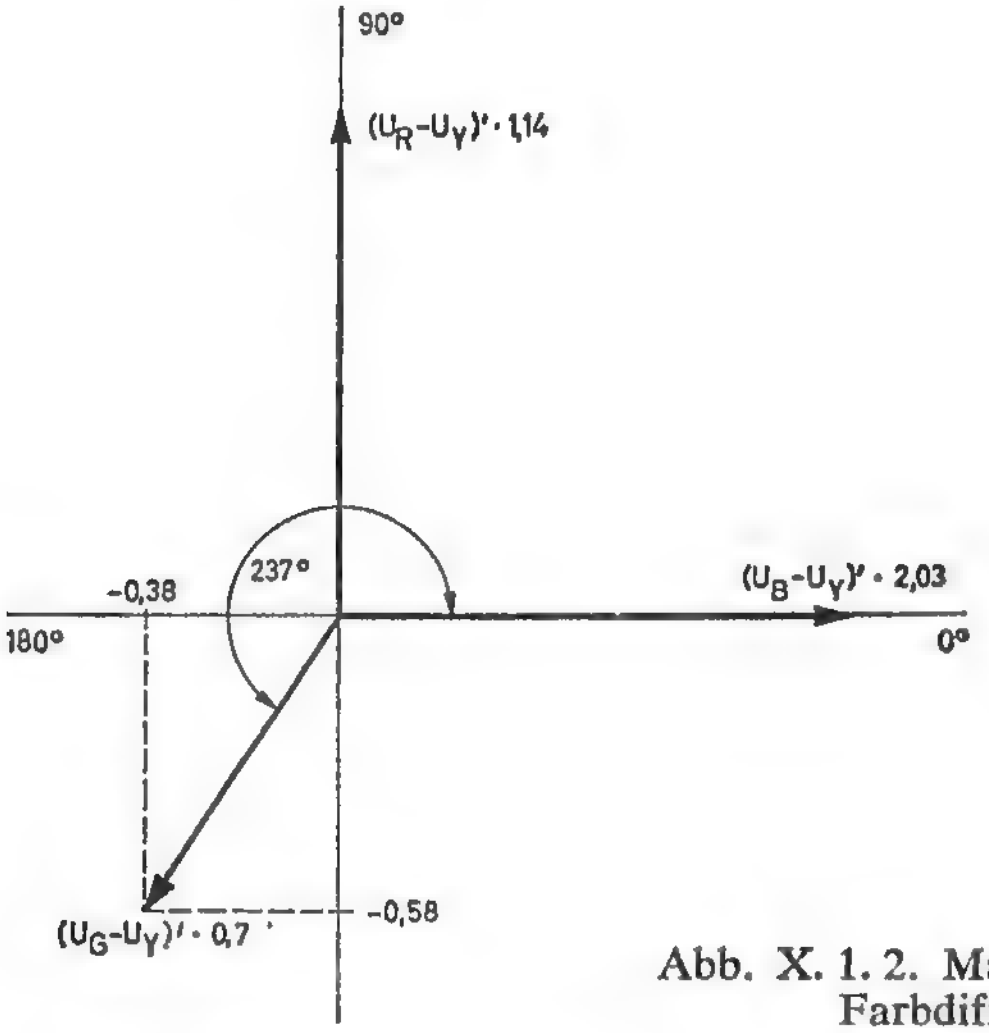


Abb. X. 1. 2. Matrixgrößen für die Gewinnung der Farbdifferenzspannung $U_G - U_Y$.

In der Abb. X. 1. 3. ist eine Schaltungsmöglichkeit angedeutet, wie man aus den beiden vom Synchrongleichrichter gelieferten Farbdifferenzspannungen $(U_R - U_Y)'$ und $(U_B - U_Y)'$ die drei Farbdifferenzspannungen $U_R - U_Y$, $U_G - U_Y$ und $U_B - U_Y$ gewinnen kann. Die Farbdifferenzspannungen vom Synchrongleichrichter werden mit negativer Polarität zwei Trioden zugeführt. Der relative Verstärkungsfaktor der Triode, die das

Farbdifferenzsignal $(U_R - U_Y)'$ erhält, muß 1,14, und die relative Verstärkung der Triode mit dem Ansteuersignal $(U_B - U_Y)' = 2{,}03$ betragen, damit die beiden Anodensignale dieser Trioden die richtigen Amplitudengrößen für die beiden Farbdifferenzspannungen $U_R - U_Y$ und $U_B - U_Y$ besitzen. Bildet man jetzt über je einen Spannungsteiler die beiden Anteile 0,58 $(U_R - U_Y)'$ und 0,38 $(U_B - U_Y)'$, so kann man diese beiden Signale einer Doppeltriode als Addierstufe zuführen und am gemeinsamen Anodenwiderstand die Farbdifferenzspannung $U_G - U_Y$ abgreifen. Bei diesem Aufbau der Matrixschaltung ist sichergestellt, daß eine minimale gegen-

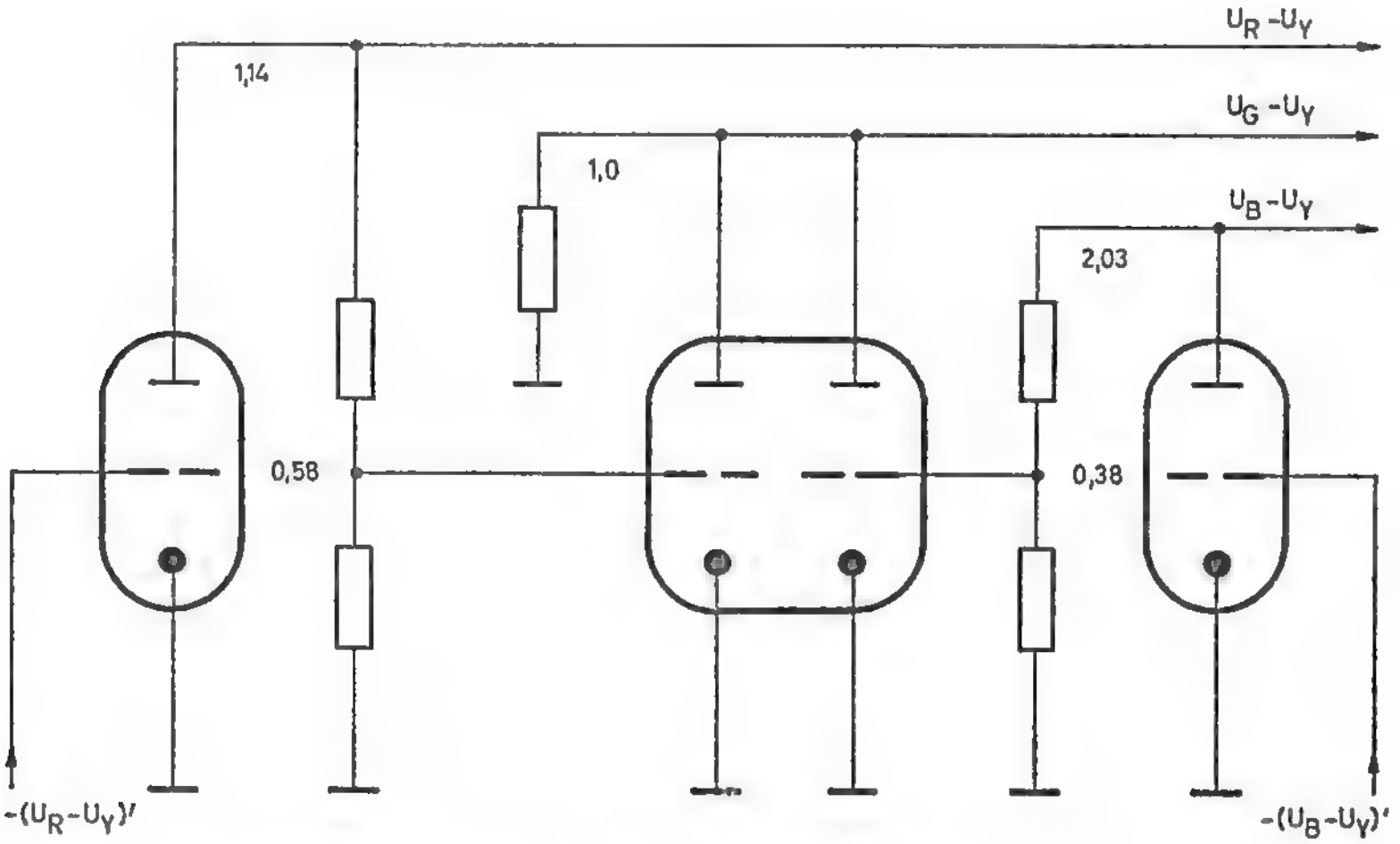


Abb. X. 1. 3. Matrixschaltung für die Umformung der Synchron-Gleichrichterspannungen $(U_R - U_Y)'$ und $(U_B - U_Y)'$ in die Farbdifferenzsignale $U_R - U_Y$; $U_G - U_Y$ und $U_B - U_Y$.

seitige Beeinflussung der drei Farbdifferenzspannungen gewährleistet ist, da die einzelnen Teilkomponenten jeweils über ein Röhrensystem gegenseitig entkoppelt sind. Damit der Gleichspannungsmittelwert der drei Farbdifferenzsignale erhalten bleibt, muß entweder vom Synchrongleichrichter bis zum Steuergitter der Dreifarben-Lochmaskenröhre eine Gleichstromkopplung vorliegen oder aber es muß an der Farbbildröhre durch eine zusätzliche Niveau-Diode der Gleichstrommittelwert wiederhergestellt werden. In diesem Punkt gelten für die drei Farbdifferenzsignale die gleichen Forderungen wie für das Leuchtdichtesignal, bei dem auch von der Video-Diode bis zur Katode der Bildröhre eine Gleichstromkopplung vorliegen muß, wenn man keine zusätzliche Niveau-Diode benutzen will.

X. 2. Matrix für I- und Q-Signalgleichrichtung

Liefert der Synchrongleichrichter zwei Farbsignale, die den beiden Farbdifferenzspannungen U_I und U_Q entsprechen, so muß die nachfolgende Matrixschaltung auch hieraus die drei Farbdifferenzspannungen $U_R - U_Y$, $U_G - U_Y$ und $U_B - U_Y$ umformen. Hierfür sind zunächst in Abb. X. 2. 1. die Vektorlagen und die relativen Amplituden der verschiedenen Teilkomponenten eingetragen. Die hierfür gültigen Ausgangsgleichungen lauten:

$$U_R - U_Y = 0{,}96\, U_I + 0{,}62\, U_Q$$

$$U_B - U_Y = -1{,}11\, U_I + 1{,}70\, U_Q$$

$$U_G - U_Y = -0{,}27\, U_I - 0{,}65\, U_Q$$

Es besteht also die Farbdifferenzspannung $U_B - U_Y$ aus 1,7 U_Q und $-1{,}11$ U_I, während die Farbdifferenzspannung $U_R - U_Y$ sich aus 0,96 U_I und 0,62 U_Q zusammensetzt und die dritte Farbdifferenzspannung $U_G - U_Y$ aus den beiden Anteilen $-0{,}65$ U_Q und $-0{,}27$ U_I aufgebaut werden kann.

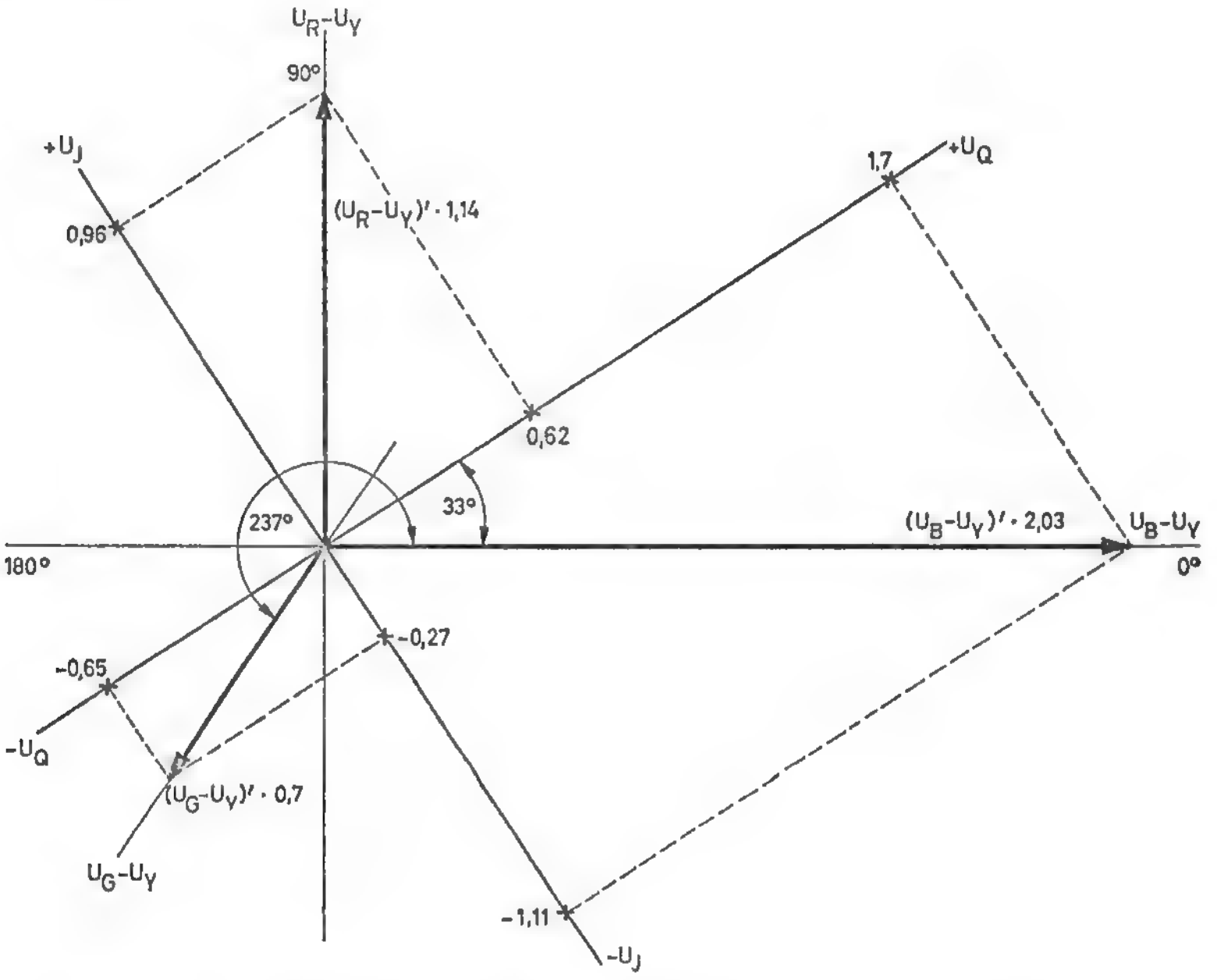


Abb. X. 2. 1. Matrixgrößen für die Umwandlung der Farbdifferenzsignale U_I und U_Q in $U_R - U_Y$; $U_G - U_Y$ und $U_B - U_Y$.

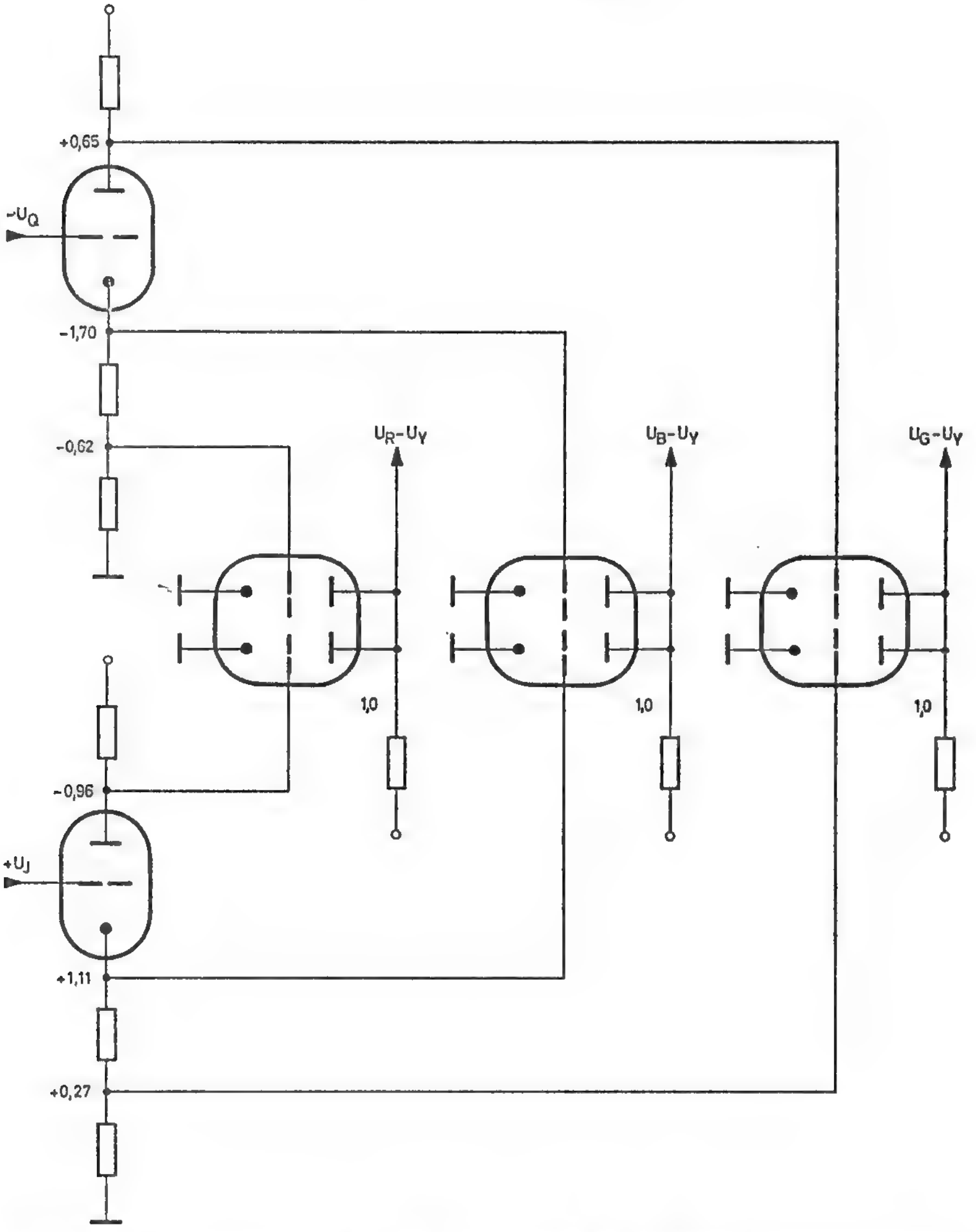


Abb. X. 2. 2. Matrixschaltung für die Umformung der Synchron-Gleichrichterspannungen U_I und U_Q in die Farbdifferenzsignale $U_R - U_Y$; $U_G - U_Y$ und $U_B - U_Y$.

Diese verschiedenen relativen Amplitudenwerte ergeben sich aus der rechtwinkligen Projektion der Farbdifferenzspannungen $(U_R - U_Y)'$ und $(U_B - U_Y)'$ auf die beiden Gleichrichterachsen U_I und U_Q. Mit Hilfe dieser relativen Amplitudengrößen muß jetzt die nachfolgende Matrixschaltung aufgebaut werden, damit die drei Farbdifferenzspannungen

U_R — U_Y, U_B — U_Y und U_G — U_Y erhalten werden. Setzt man die gleiche minimale gegenseitige Beeinflussung in der Matrixschaltung, wie im vorigen Abschnitt, voraus, so kommt man zu einer Schaltanordnung, die in Abb. X. 2. 2. dargestellt ist. Je einer Triode wird die Farbdifferenzspannung U_I bzw. U_Q vom Synchrongleichrichter zugeführt. An den Anoden- bzw. Katodenwiderständen dieser Eingangstrioden kann man die entsprechenden relativen Amplitudenwerte für U_I mit 0,27, 1,11 und —0,96 abgreifen, während für U_Q die entsprechenden Werte —0,62, —1,70 und 0,65 betragen. In je einer Doppeltriode wird dann durch Addition das entsprechende Farbdifferenzsignal am gemeinsamen Anodenwiderstand abgenommen. Ein flüchtiger Vergleich zeigt hier bereits, daß eine Matrixschaltung für die Gewinnung der Farbdifferenzspannungen aus den Synchrongleichrichtersignalen U_I und U_Q einen erheblich größeren Aufwand voraussetzt, wobei noch zusätzlich zu beachten ist, daß durch die unterschiedlichen Bandbreiten von 600 kHz bzw. 1,8 MHz für U_Q und U_I ein Laufzeitausgleich in Form einer Laufzeitkette im Verstärkungskanal für das U_I-Signal angebracht werden muß. In Heimempfängern wird deshalb durchweg auf die mögliche bessere Farbauflösung mit den U_I- und U_Q-Signalen verzichtet.

X. 3. Verkettung zwischen Matrix und Synchrongleichrichtung

Im vorigen Abschnitt sahen wir bereits, daß auch bei der vom Synchrongleichrichter gelieferten Farbdifferenzspannung U_I und U_Q durch Umformung in der Matrix die Farbdifferenzspannungen U_R — U_Y, U_G — U_Y und U_B — U_Y zurückgewonnen werden konnten, obgleich zwischen beiden Farbachsen eine Phasendrehung von 33° besteht. Dies liegt darin begründet, daß in einer Matrixschaltung die Addition zweier Farbdifferenzspannungen als Projektion dieser Spannungen auf rechtwinklige Achsen eines Achsenkreuzes aufgefaßt werden kann und damit die gebildeten Summen- bzw. Differenzspannungen in dieser Vektordarstellung nach Amplitude und Phasenwinkel definiert sind. Es ist sehr wichtig zu erkennen, daß die starke Phasenabhängigkeit der Synchrongleichrichterschaltungen auf die wiedergewonnenen Farbspannungen in analoger Weise auch in der Matrixschaltung vorhanden ist, so daß eine unlösliche Verkettung zwischen beiden Schaltungsgruppen vorhanden ist. Wenn also eine unmittelbare Wechselbeziehung zwischen der Synchrongleichrichtung und der Matrixschaltung besteht, so kann man bei richtiger Dimensionierung im Grundprinzip die beiden Synchrongleichrichterachsen phasenmäßig an beliebigen Stellen des gesamten Achsenkreuzes anordnen, wenn nachfolgend die Matrixschaltung hierauf Rücksicht nimmt.

Untersucht man diese Möglichkeiten, so kommt man zu besonders vor-

teilhaften Schaltungen, wenn die beiden Synchrongleichrichterachsen im negativen $(U_R - U_Y)'$- und $(U_B - U_Y)'$-Feld des Achsenkreuzes liegen. Will man hierbei mit einem minimalen Aufwand in der nachfolgenden Matrixschaltung auskommen, so kann man eine Anordnung finden, die sich aus zwei Trioden mit je einem Anodenwiderstand und verkoppelten Katodenwiderständen aufbauen läßt. Diese Matrixschaltung ist in Abb. X. 3.1. angedeutet. An den beiden Anoden werden die Farbdifferenzspannungen $U_B - U_Y$ und $U_R - U_Y$ abgegriffen, während am Katodenwiderstand der zweiten Triode die dritte Farbdifferenzspannung $U_G - U_Y$ zur Verfügung steht. Das Steuergitter der ersten Triode erhält vom Synchrongleichrichter eine Farbspannung U_A und das Steuergitter der zweiten Triode eine Farbspannung U_B. Die relative Größe und Phasenlage dieser beiden vom Synchrongleichrichter gelieferten Farbspannungen ist in der Abb. X. 3. 2. eingezeichnet. Es ist zu erkennen, daß beide Farbspannungen U_A und U_B vektormäßig in der Nähe der Farbdifferenzspannung $U_G - U_Y$ liegen. Durch die verkoppelten Katodenwiderstände beider Trioden wird die Steuerspannung jeder Triode aus Anteilen beider Farbspannungen U_A und U_B bestehen. Bei richtiger Dimensionierung der drei Katodenwiderstände kann man erreichen, daß am Katodenwiderstand der zweiten Triode die Farbdifferenzspannung $U_G - U_Y$ entsteht.

Aus der Abb. X. 3. 1. ist zu erkennen, daß diese Katodenspannung sich

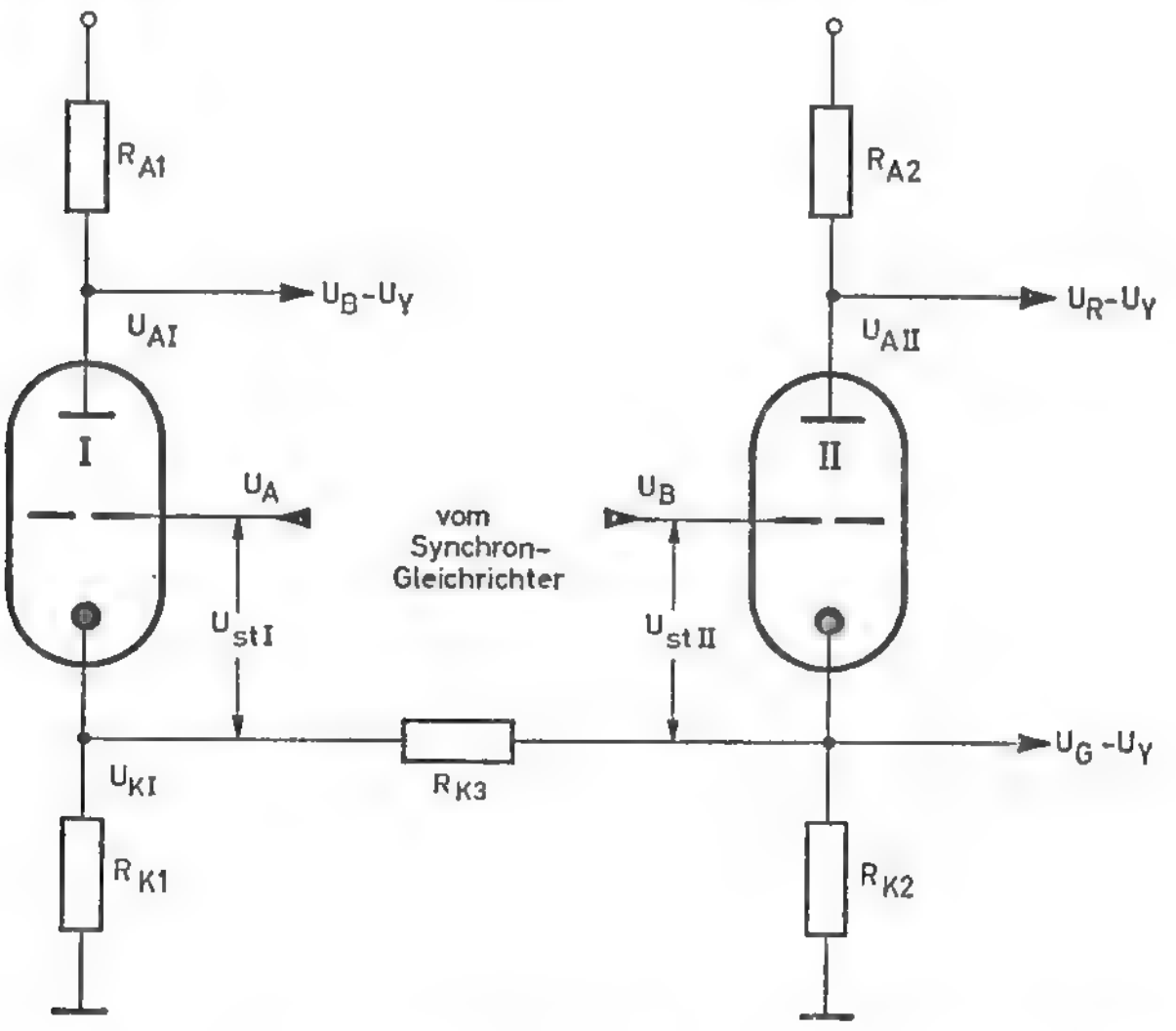


Abb. X. 3. 1. Matrixschaltung für die Umformung der Synchron-Gleichrichterspannungen U_A und U_B in die Farbdifferenzspannungen $U_R - U_Y$; $U_B - U_Y$ und $U_G - U_Y$.

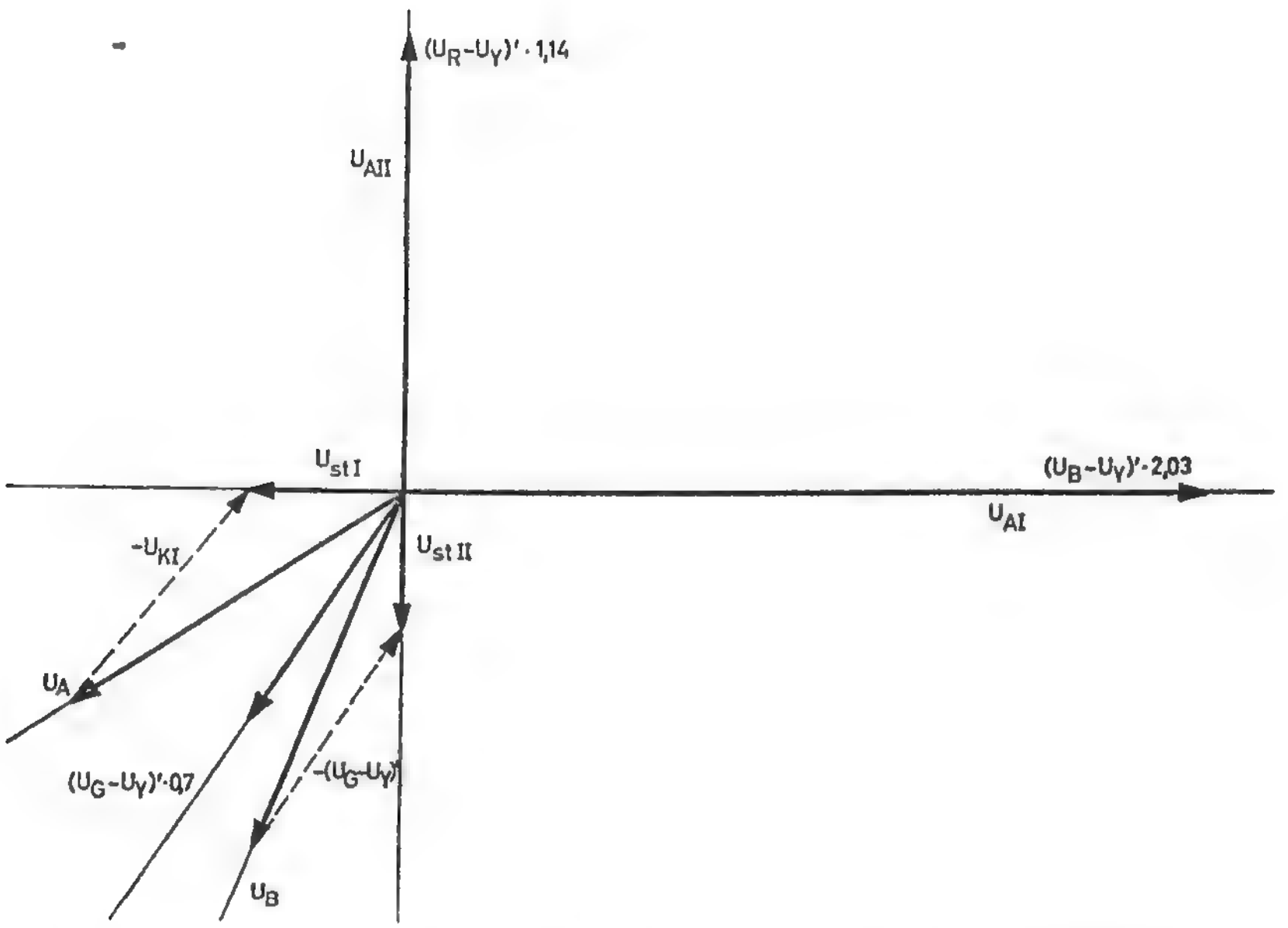


Abb. X. 3. 2. Lage der Vektoren für die Umwandlung der Synchrongleichrichterspannungen U_A und U_B in die Farbdifferenzspannungen $U_R - U_Y$, $U_B - U_Y$ und $U_G - U_Y$.

aus der Gegenkopplungsspannung, herrührend von der Steuergitterspannung U_B und einem Anteil der Katodenspannung U_K der ersten Triode aufbaut. Gleichzeitig muß sichergestellt sein, daß die Differenz aus Steuergitterspannung U_B und Katodenspannung $U_G - U_Y$ an der zweiten Triode eine Steuerspannung U_{ST} ergibt, die die entgegengesetzte Phasenlage der Farbdifferenzspannung $U_R - U_Y$ aufweist, damit am Anodenwiderstand der zweiten Triode diese Farbdifferenzspannung abgegriffen werden kann. In ähnlicher Weise muß an der ersten Triode sich aus der Steuergitterspannung U_A und der Katodenspannung U_K eine Steuerspannung U_{ST} einstellen, die in Gegenphase zur Farbdifferenzspannung $U_B - U_Y$ steht. Damit kann man durch Wahl der beiden Synchrongleichrichterachsen in der Phasenlage U_A und U_B eine Matrix mit zwei Trioden aufbauen, die alle drei Farbdifferenzspannungen liefert, wobei sowohl die richtigen Amplitudenwerte als auch der Gleichspannungsmittelwert durch Gleichstromkopplung bis zur Bildröhre erhalten bleibt.

Zusammenfassung

In verschiedenen Schaltungskombinationen wurde gezeigt, daß die Matrix-

stufen in einer unmittelbaren Wechselbeziehung zu den Synchrongleichrichtern stehen. Die Wahl der Synchrongleichrichterachsen bestimmt dabei nicht nur die erforderlichen relativen Verstärkungsgrößen in der Matrixschaltung zur Gewinnung der drei Farbdifferenzspannungen $U_R - U_Y$, $U_G - U_Y$ und $U_B - U_Y$, sondern legt auch unmittelbar den gesamten Aufwand der erforderlichen Matrixstufen fest. Umgekehrt findet man in der Matrixstufe durch die Zusammenfassung verschiedener Teilkomponenten der vom Synchrongleichrichter gelieferten Farbspannungen ein Ausgangssignal, das die gleiche Form aufweist, wie es bei entsprechender Phasenlage der Synchrongleichrichter liefern würde. Jede beliebige Phasenlage der Synchrongleichrichterachsen kann also jeweils in den Matrixstufen entsprechend berücksichtigt werden.

Aus dieser starken Wechselbeziehung zwischen Matrixschaltung und Synchrongleichrichter abgeleitet, kann man zwei Synchrongleichrichterachsen phasenmäßig so festlegen, daß eine Matrixschaltung erhalten wird, die mit minimalen Aufwand aus den Synchrongleichrichtersignalen die drei Farbdifferenzspannungen zurückgewinnt.

KAPITEL XI

WIEDEREINFÜHRUNG DES FARBTRÄGERS UND SEINE SYNCHRONISIERUNG

Übersicht

Zur Erzeugung der Farbträgerschwingung im Empfänger wird meistens ein Quarzoszillator benutzt. Die Verkopplung mit dem Sendersignal übernimmt eine Reaktanzstufe, die entweder als Blindwiderstand induktiven oder kapazitiven Charakter hat und parallel zum Resonanzkreis des Oszillators liegt. Eine Regelspannung, die von einem Phasendiskriminator erzeugt wird, synchronisiert den Oszillator mit dem Farbsynchronsignal, dem sogenannten „Burst", der Senderschwingung. Durch Steilheitsänderung der Reaktanzstufe kann der kapazitive bzw. induktive Blindwiderstand in seiner Größe geregelt werden. Ist die Steilheitsänderung von der Regelspannung eines Phasendiskriminators abhängig, so besteht eine direkte Verkopplung zwischen dem Farbsynchronsignal des Senders und dem Quarzoszillator, wenn beide Schwingungen den Phasendiskriminator steuern. Dieser erzeugt, abhängig von der gegenseitigen Phasenlage der Farbträgerschwingung des Quarzoszillators und des Farbsynchronsignals des Senders, eine Regelspannung, die so gepolt ist, daß über die nachfolgende Steilheitsänderung der Reaktanzstufe eine phasenstarre Verkopplung vorgenommen wird. Ein zwischen dem Phasendiskriminator und der Reaktanzstufe liegendes Siebglied sorgt als Tiefpaßfilter für die Glättung der Regelspannung und eine entsprechende Abschwächung von Rausch- und Störamplituden.

XI. 1. Quarzoszillator und Reaktanzröhre

Nimmt man im Empfänger die Erzeugung der Farbträgerschwingung mit einer Quarzoszillatorschaltung vor, so muß diese Trägerschwingung vom Farbsynchronsignal des Senders synchronisiert werden. Dies kann über eine Reaktanzröhrenschaltung, die von der Regelspannung eines Phasendiskriminators gesteuert wird, vorgenommen werden.

In der Abb. XI. 1. 1. ist ein derartiges Grundschema als Blockschaltbild angegeben. Parallel zu einem Quarzoszillator, der auf der Farbträgerfrequenz von 4,4296875 MHz schwingt, liegt eine Reaktanzstufe. Diese Reaktanzstufe hat entweder induktiven oder kapazitiven Charakter, d.h.

zwischen Anodenstrom und Anodenspannung herrscht eine Phasenverschiebung von 90°. Dem Phasendiskriminator führt man sowohl die Farbträgerschwingung des Quarzoszillators als auch das Farbsynchronsignal, den sogenannten „Burst", des Senders zu. Die von der gegenseitigen Phasenlage dieser beiden Schwingungen abhängige Regelspannung des Phasendiskriminators steuert die Reaktanzstufe und bestimmt die Größe des induktiven bzw. kapazitiven Blindwiderstandes. Es ist dies das gleiche Grundprinzip wie bei der Horizontalsynchronisierung der meisten Schwarz/

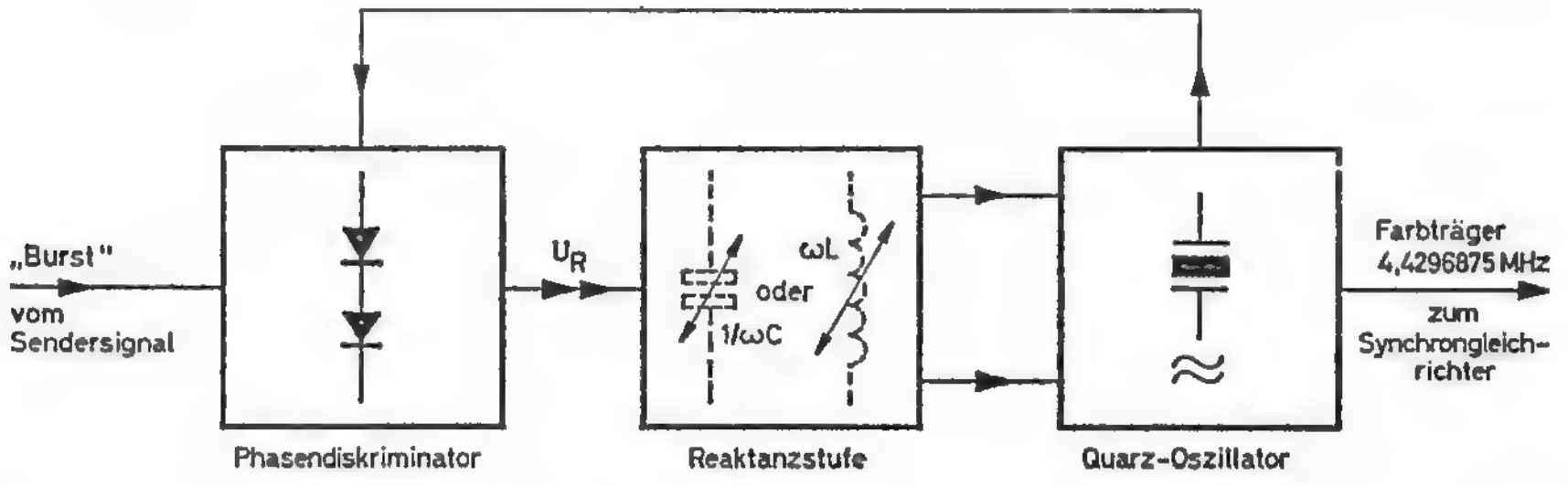


Abb. XI. 1. 1. Verkopplung des Farbträger-Oszillators mit dem Sendersignal über Reaktanzstufe und Phasendiskriminator.

Weiß-Empfänger, wo auch über den Phasenvergleich und eine Reaktanzstufe der Horizontaloszillator mit den Synchronimpulsen des Senders synchronisiert wird. Der „Burst" des Sendersignals besteht, wie noch einmal in Abb. XI. 1. 2. angedeutet, aus 8 bis 11 Schwingungen der senderseitigen Farbträgerschwingung mit der Phasenlage von 180°, bezogen auf die $(U_B - U_Y)'$ — Modulationsachse. Dieser Schwingungszug sitzt jeweils auf der hinteren Schwarzschulter der horizontalen Austastlücke. Der Phasen-

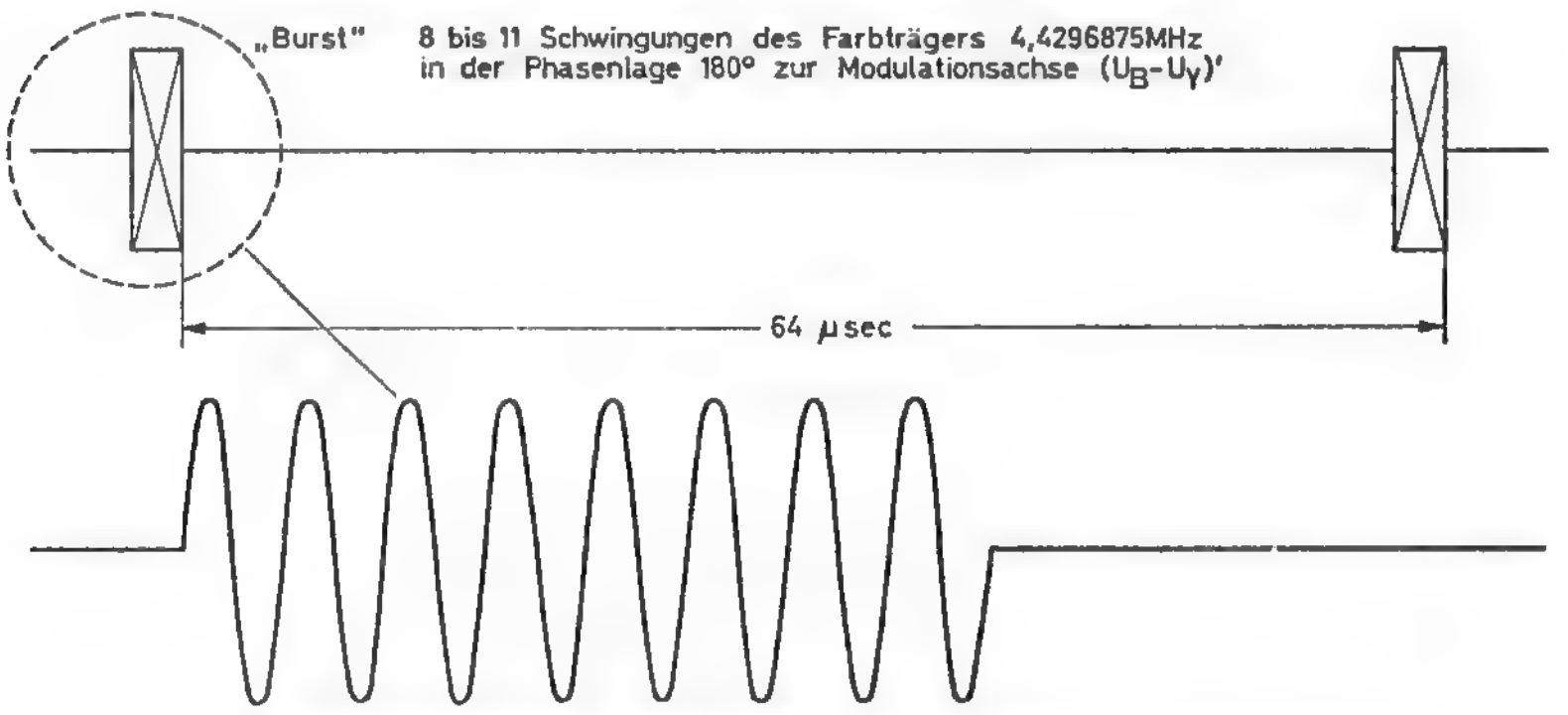


Abb. XI. 1. 2. Farbsynchronsignal für die Phasensynchronisierung des Farbträgeroszillators im Empfänger.

diskriminator kann also auch nur während der hinteren Schwarzschulter der horizontalen Austastlücke in Funktion treten und eine Regelspannung erzeugen. Deshalb muß am Ausgang durch ein entsprechendes Siebglied die Regelspannung so weit geglättet werden, daß über die gesamte Zeilenperiode keine nennenswerte Änderung erfolgen kann.

Um die Grundfunktion eines Quarzoszillators zu erklären, sollen aus der Vielzahl der möglichen Schaltungen zwei der gebräuchlichsten Anordnungen ausgewählt werden.

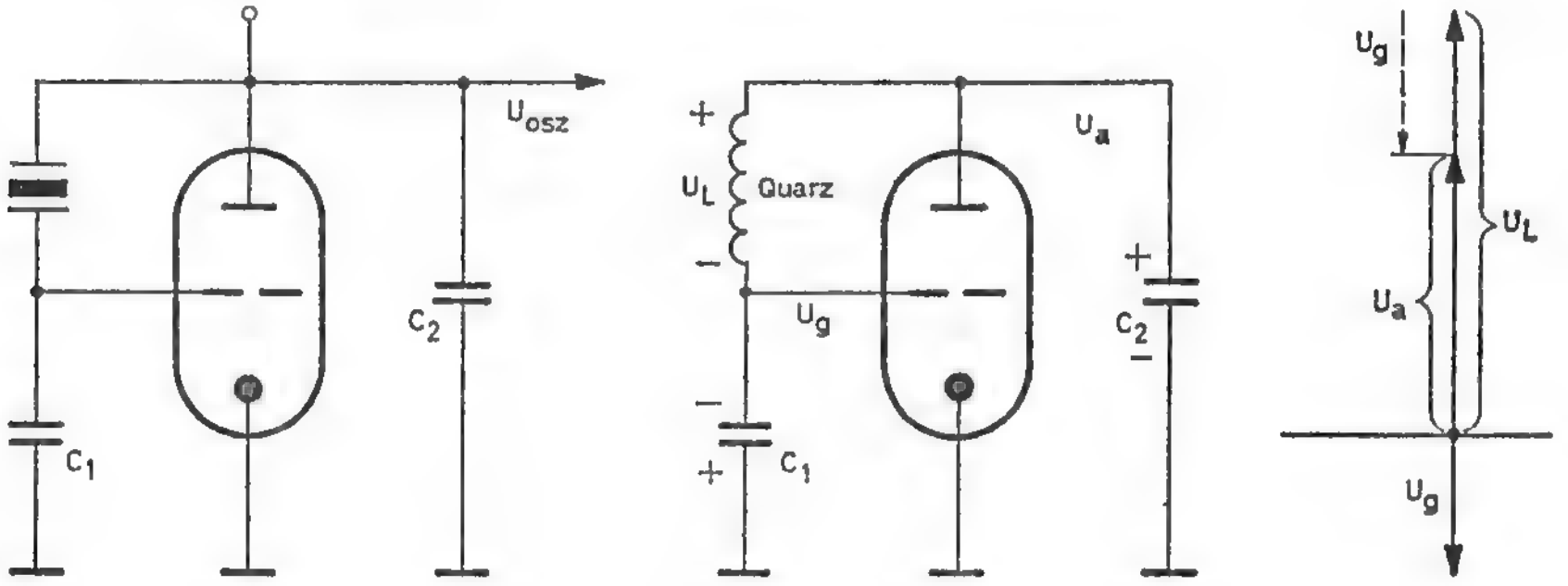


Abb. XI. 1. 3. Grundschaltungen eines Quarzoszillators mit den Ersatzschaltbildern und den Spannungsvektoren.

Hierfür ist in der Abb. XI. 1. 3. neben der Grundschaltung auch das Ersatzschaltbild und die dazugehörige Lage der einzelnen Spannungskomponenten eingetragen. Wird der Schwingquarz zwischen dem Steuergitter und der Anode einer Röhre angeordnet, so muß, um die gegenphasige Spannung für die benötigte Rückkopplung der Oszillatorschaltung zu erhalten, vom Steuergitter und von der Anode gegen Masse je ein Kondensator angeordnet werden. In dieser Schaltung wird der Resonanzkreis des Quarzoszillators vom induktiven Blindwiderstand des Quarzes und den beiden Kondensatoren gebildet. Die Gitterspannung U_g entspricht also der

Spannung am Kondensator C_1, während die Anodenspannung U_a der Spannung am Kondensator C_2 gleicht. Da der Schwingkreisstrom durch beide Kondensatoren fließt, sind damit, bezogen gegen Masse, die Gitter- und Anodenspannung gegenphasig und die Spannung am induktiven Blindwiderstand des Quarzes entspricht der Summe der beiden kapazitiven Spannungen, also U_a und U_g.

Liegt der Schwingquarz vom Steuergitter gegen Masse, so muß sowohl von der Katode gegen Masse als auch zwischen dem Steuergitter und der Katode ein Kondensator vorhanden sein. Das Ersatzschaltbild dieser Oszillatorschaltung sieht dann so aus, daß parallel zum induktiven Blindwiderstand des Quarzes die beiden Kondensatoren in Serie liegen. Die Gitterspannung U_g entspricht damit der Spannungskomponente am induktiven Blindwiderstand des Quarzes. Über die kapazitive Spannungsteilung entsteht am Kondensator C_2 in der Katodenleitung die Katodenspannung U_k. Die Spannung am Kondensator zwischen dem Steuergitter und der Katode entspricht der Steuerspannung U_{st} der Röhre, also der Gitterspannung U_g abzüglich der Katodenspannung U_k. Da die Gitter- und Katodenspannung in dieser Schaltung gleichphasig ist, ist auch hier die erforderliche Rückkopplungsbedingung für eine Oszillatorschaltung erfüllt.

Der frequenzbestimmende Einfluß einer Reaktanzstufe auf eine Oszillatorschaltung ist in Abb. XI. 1. 4. angedeutet. Die Oszillatorschaltung besteht dabei aus einem Parallel-Resonanzkreis, der mit den beiden Werten des induktiven und kapazitiven Blindwiderstandes die Resonanzfrequenz bestimmt. Dic Reaktanzstufe, parallel zum Oszillatorkreis, kann mit ihrem induktiven oder kapazitiven Blindwiderstand diese Resonanz-frequenz entsprechend verändern.

Um mit einer Reaktanzstufe einen induktiven bzw. kapazitiven Blindwiderstand zu erzeugen, muß zwischen der Steuergitterspannung und der Anodenspannung eine Phasenverschiebung von 90° bestehen. In der Abb.

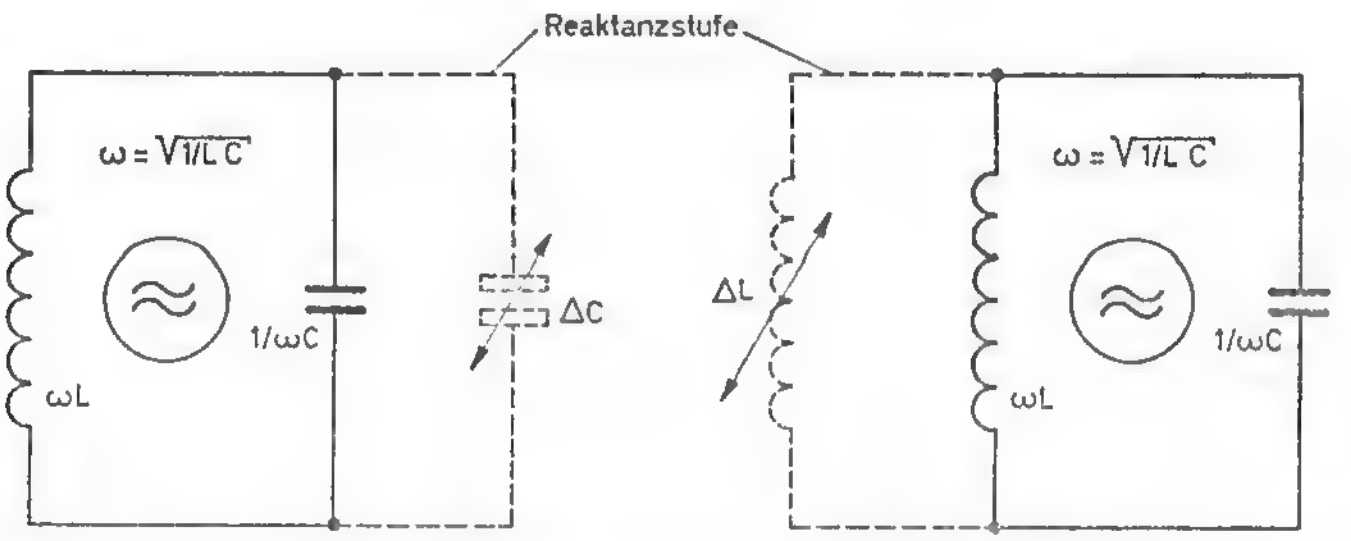


Abb. XI. 1. 4. Frequenzbestimmender Einfluß der Reaktanzstufe durch Ankopplung an den Oszillatorkreis.

XI. 1. 5. ist angedeutet, wie man mit einer Triode durch eine Phasenverschiebung zwischen der Steuergitter- und Anodenspannung einen kapazitiven Blindwiderstand herstellen kann. Die Anodenwechselspannung der Röhre wird durch die Oszillatorspannung bestimmt. Über einen

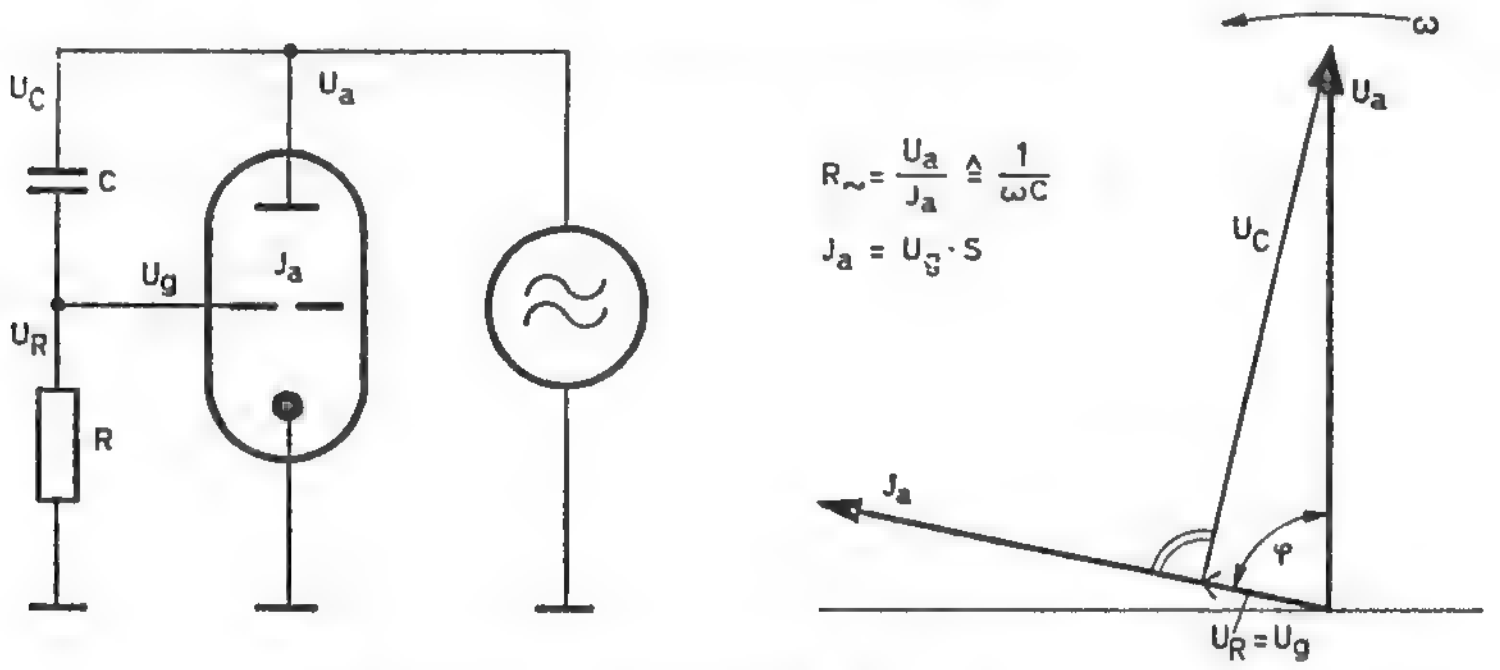


Abb. XI. 1. 5. Reaktanzröhrenschaltung als kapazitiver Blindwiderstand.

Spannungsteiler, der aus einem kapazitiven Widerstand $1/\omega C$ und einem ohmschen Widerstand R besteht, wird die Gitterwechselspannung U_g für die Röhre abgegriffen. Wird der kapazitive Widerstand $1/\omega C$ wesentlich größer als der ohmsche Widerstand R gemacht, so bestimmt allein der kapazitive Widerstand den über diesen Spannungsteiler fließenden Strom.

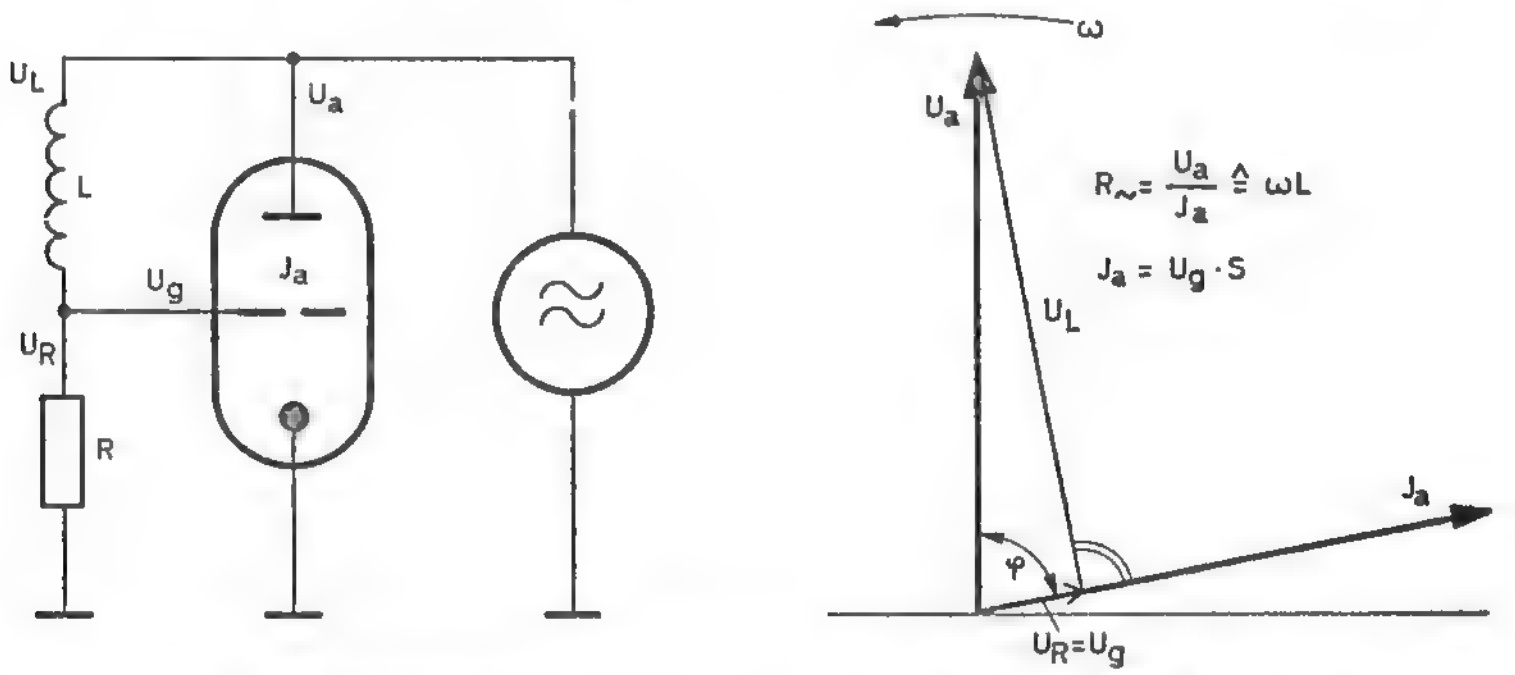


Abb. XI. 1. 6. Reaktanzröhrenschaltung als induktiver Blindwiderstand.

Damit eilt dieser Strom der Anodenspannung U_a um fast 90° vor. Von diesem Strom bestimmt, steht damit auch am ohmschen Widerstand eine Spannung, die der Anodenspannung um fast 90° voreilt. Da die Spannung am ohmschen Widerstand der Steuergitterspannung der Röhre entspricht, wird hiervon der fließende Anodenstrom I_a erzeugt. Zwischen dem Anodenstrom I_a und der Anodenspannung U_a herrscht damit eine Phasen-

verschiebung von fast 90°, so daß die Röhre als Wechselstromwiderstand einen kapazitiven Blindwiderstand darstellt.

Soll dagegen die Reaktanzstufe einen induktiven Blindwiderstand ergeben, so muß die Gitterspannung U_g der Anodenspannung U_a um 90°

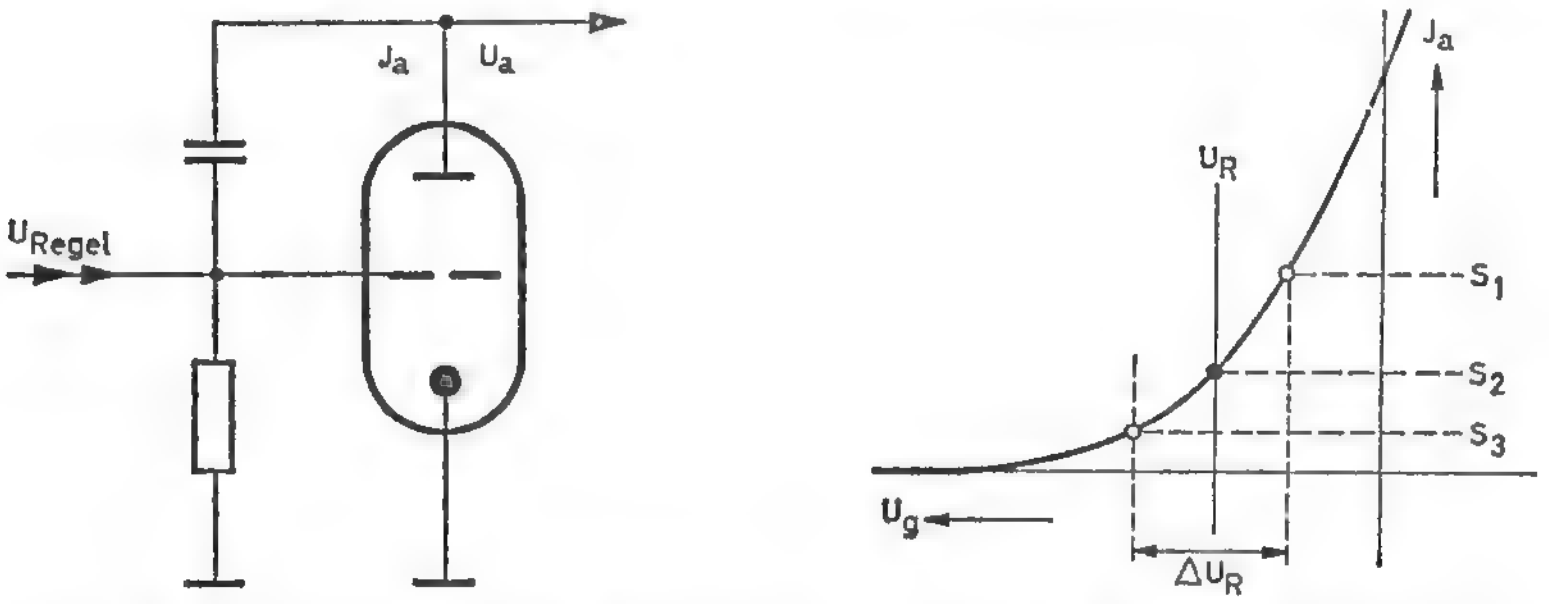


Abb. XI. 1. 7. Regelung des Blindwiderstandes durch Steilheitsänderung an der Reaktanzröhre.

nacheilen. Dies ist in Abb. XI. 1. 6. angedeutet. Der Spannungsteiler besteht dabei aus einem induktiven Widerstand ωL und einem ohmschen Widerstand R. Es muß auch hier wiederum der induktive Widerstand wesentlich größer als der ohmsche Widerstand sein. Der fließende Strom über den Spannungsteiler wird dann vom induktiven Widerstand bestimmt und eilt der Anodenspannung um fast 90° nach. Es steht damit am ohmschen Widerstand eine Spannung, die gleichfalls um 90° der Anodenspannung nacheilt. Da dies die Gitterspannung ist, wird auch der fließende Anodenstrom I_a der Anodenspannung U_a um fast 90° nacheilen, so daß die Röhre als Wechselstromwiderstand induktiven Charakter hat. Dieser induktive als Wechselstromwiderstand induktiven Charakter hat.

Dieser induktive bzw. kapazitive Blindwiderstand muß, damit eine Frequenzregelung der Oszillatorschaltung möglich ist, in seiner Größe verändert werden können. Da der Wechselstromwiderstand der Reaktanzstufe vom Verhältnis U_a/I_a bestimmt wird, kann durch die Regelung des Anodenstromes I_a dieser Wechselstromwiderstand variiert werden. Am einfachsten ist dies durchzuführen, wenn der Arbeitspunkt und damit die Steilheit der Röhre mit Hilfe einer Gittervorspannung verändert wird.

Der Anodenstrom I_a ist dabei abhängig von der Gitterwechselspannung U_g, multipliziert mit der Steilheit S. Eine Vergrößerung der Steilheit S hat einen größeren Anodenstrom I_a und eine Verkleinerung der Steilheit S eine entsprechende Verminderung des Anodenstromes zur Folge. In der Abb. XI. 1.7. sind für drei verschiedene Arbeitspunkte die von der Vorspannung

abhängigen Steilheiten auf der Röhrenkennlinie eingezeichnet. Wird z.B. durch eine Vorspannungsänderung die Steilheit vergrößert, so wird bei einer Reaktanzröhrenschaltung als kapazitiver Blindwiderstand der kapazitive Widerstand kleiner und damit die dargestellte scheinbare Kapazität größer. Dies hätte eine Frequenzverminderung der Oszillatorschaltung zur Folge. Bei einem induktiven Blindwiderstand als Reaktanzstufe würde bei gleicher Steilheitsänderung der induktive Widerstand kleiner und damit die scheinbare Induktivität vermindert. Die Oszillatorfrequenz würde in diesem Fall also höher werden. Um eine Verkopplung mit dem Sendersignal zu erhalten, braucht man also nur diese Steilheitsänderung der Reaktanzröhre durch die entsprechend gepolte Regelspannung eines Phasendiskriminators vornehmen zu lassen.

XI. 2. Phasensynchronisierung des Oszillators

Damit eine direkte Verkopplung der im Empfänger erzeugten Farbträgerschwingung mit dem Farbsynchronsignal des Senders möglich ist, muß, abhängig von der relativen Phasenlage beider Schwingungen zueinander, in einer Phasendiskriminatorschaltung eine Regelspannung erzeugt werden. Da der Farbsynchronschwingungszug des Senders nur während der hinteren Schwarzschulter der Horizontal-Austastlücke vom Sender ausgestrahlt wird, ist der Phasendiskriminator auch nur in diesem Zeitraum wirksam.

Es wird deshalb vielfach in den praktischen Emfängerschaltungen der Eingang des Phasendiskriminators nur während der horizontalen Austastlücke durch Zeilenrückschlagimpulse aufgetastet, damit in den dazwischenliegenden Zeiträumen keine Rausch- und Störamplituden Einfluß auf die erzeugte Regelspannung gewinnen können. Damit eine konstante Regelspannung für die gesamte Zeilenperiode erhalten wird, muß also am Ausgang des Phasendiskriminators ein Siebglied als Tiefpaßfilter angeordnet werden. Die Grundschaltung des Phasendiskriminators und seine Funktion entspricht den Phasendiskriminatoren der Horizontal-Synchronisationsschaltungen in den Schwarz/Weiß-Empfängern. Der Aufbau eines derartigen Phasendiskriminators ist in der Abb. XI. 2. 1. dargestellt. Er wird an die Mitte zweier Dioden das Farbsynchronsignal des Senders gelegt. Parallel zu diesen beiden Dioden sind zwei hochohmige Arbeitswiderstände angeordnet, an deren Mittelpunkt die Regelspannung abgegriffen wird, nachdem sie über ein Siebglied geglättet wurde. Der Anode bzw. Katode der Dioden wird eine gegenphasige Farbträgerschwingung des Empfängeroszillators zugeführt.

Zwischen dem Schwingungszug des Farbsynchronsignals und der Farbträgerschwingung muß für den stabilen Arbeitspunkt der gesamten Regel-

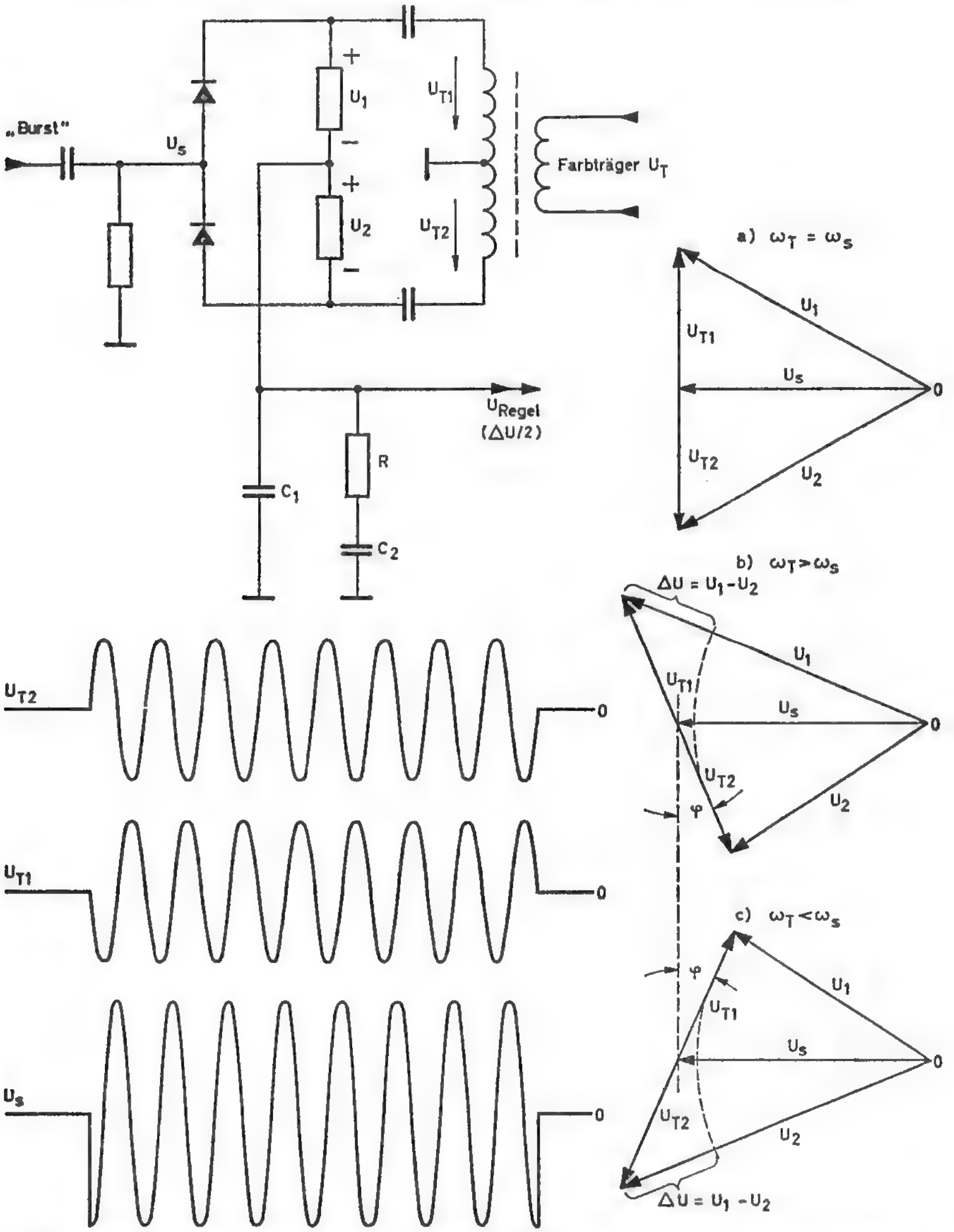


Abb. XI. 2. 1. Phasendiskriminator zur Erzeugung einer Regelspannung in Abhängigkeit von der Phasendifferenz zwischen Farbträger und „Burst".

schaltung und damit für die Regelspannung Null eine Phasenverschiebung von 90° bestehen. Die beiden gegenphasigen Schwingungsamplituden U_{T1} und U_{T2} mit der Phasenverschiebung von 90° zum Farbsynchronsignal U_S sind in der Abb. XI. 2. 1. sowohl als Schwingungszüge als auch

im Vektor-Diagramm eingezeichnet. Man erkennt, daß an den beiden hochohmigen Arbeitswiderständen zwei Gleichspannungen entstehen, die bei einer Phasenverschiebung von 90° gleich groß sind. Der Mittelpunkt der beiden hochohmigen Arbeitswiderstände, an dem die Regelspannung abgegriffen wird, hat damit, bezogen auf Masse, Null Volt. Man sieht im Vektordiagramm, daß sich zum Farbsynchronsignal U_S rechtwinklig die Farbträgerschwingung U_{T1} und U_{T2} addiert, so daß von den beiden Dioden die Richtspannungen U_1 und U_2 mit gleich großer Amplitude an den Arbeitswiderständen erzeugt werden.

Ändert sich jetzt die Frequenz der Farbträgerschwingung des Empfängers zu höheren Werten hin, so bedeutet dies, daß die Phasenverschiebung zwischen der Farbträgerschwingung und dem Farbsynchronsignal größer als 90° wird. Damit ergibt sich, wie im Vektordiagramm angedeutet, eine Spannung U_1, die entsprechend größer und eine Spannung U_2, die kleiner wird.

Am Mittelpunkt beider Arbeitswiderstände stellt sich eine Regelspannung ein, die der halben Differenz der Spannungen U_1 und U_2 entspricht. Diese Regelspannung ist positiv. Ist dagegen in umgekehrter Weise die Frequenz des Farbträgeroszillators kleiner als das Farbsynchronsignal des Senders, so ist die Phasenverschiebung zwischen beiden Schwingungszügen kleiner als 90°. In diesem Fall wird die erzeugte Richtspannung U_2 entsprechend größer und die Richtspannung U_1 kleiner. Es entsteht am Verbindungspunkt beider Arbeitswiderstände wiederum eine Regelspannung, die aus der halben Differenz der beiden Spannungen U_1 und U_2 besteht. Diesmal ist jedoch die Regelspannung negativ. Zu beachten ist, daß die in der Abb. XI. 2. 1. eingezeichneten Vektorlagen nur für einen herausgegriffenen bestimmten Zeitpunkt beider Schwingungszüge gelten, da sich bei einer effektiven Frequenzdifferenz zwischen beiden Schwingungen die relative Phasendifferenz mit der Differenzfrequenz beider Schwingungszüge kontinuierlich von 0° bis 360° verändert. Es soll hier nur angedeutet werden, wie die relative Phasendifferenz zwischen dem Farbsynchronsignal des Senders und der Farbträgerschwingung des Empfängers eine direkt proportionale Regelspannung hervorruft, die dann über Reaktanzstufe und Quarzoszillator einen stabilen Arbeitspunkt der Gesamtschaltung gewährleistet und damit eine Phasensynchronisierung der Farbträgerschwingung ermöglicht.

Damit die Regelspannung des Phasendiskriminators für die Ansteuerung der Reaktanzstufe über die Zeilenperiode konstant bleibt, muß zur Glättung dem Phasendiskriminator ein Siebglied als Tiefpaß nachgeschaltet werden. Gleichzeitig wird durch dieses Siebglied der Einfluß von Rausch-

und Störspannungen sehr stark herabgesetzt, so daß die gleiche Stabilität und Unempfindlichkeit für die Phasensynchronisierung erzielt wird wie bei der Horizontal-Synchonisierung der Schwarz/Weiß-Geräte mit Hilfe von Phasenvergleichsschaltungen.

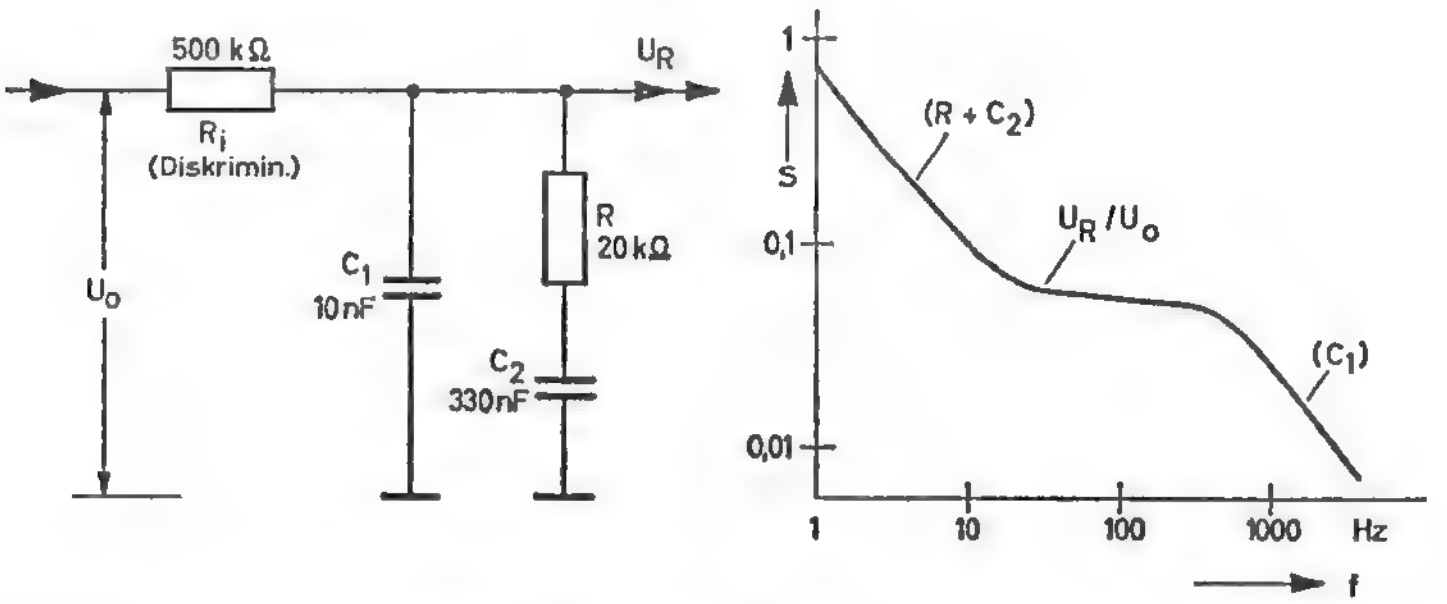


Abb. XI. 2. 2. Tiefpaßfilter zur Glättung der Diskriminatorregelspannung.

In der Abb. XI. 2. 2. ist der Siebfaktor *S* eines Tiefpasses mit den eingesetzten Widerstands- und Kapazitätswerten angegeben. Benutzt man als hochohmige Arbeitswiderstände in der Phasendiskriminatorschaltung der Abb. XI. 2. 1. Widerstände von ca. 1 MΩ, so hat der Diskriminator einen Innenwiderstand von ca. 500 kΩ. Dieser Innenwiderstand ergibt zusammen mit dem nachfolgenden *RC*-Glied, gebildet aus $C_1 = 10$ nF und der Parallelschaltung von $R = 20$kΩ und $C_2 = 330$ nF, die entsprechende Absiebung. Wird die Diskriminatorspannung vor der Absiebung mit U_0 bezeichnet und die Ausgangsspannung mit U_R, so ist der Siebfaktor S das Verhältnis aus U_R/U_0. Für sinusförmige Diskriminatorspannungen U_0 ergibt sich mit den angegebenen Werten ein Amplitudenverlauf des Siebfaktors S in Abhängigkeit von der Frequenz, der zwei annähernd gleiche Absenkungen aufweist, während dazwischen ein nahezu konstanter Bereich vorhanden ist. Der erste Amplitudenabfall bis ca. 50 Hz wird durch den Widerstandswert der Serienschaltung aus R und C_2 bestimmt, während der zweite Abfall ab ca. 300 Hz praktisch allein vom Wechselstromwiderstand des Kondensators C_1 herrührt. Zwischen 50 Hz und 300 Hz ist der Amplitudenverlauf des Siebfaktors fast konstant und wird praktisch durch die Größe des Widerstandes R allein bestimmt, da der kapazitive Widerstand von C_2 in diesem Bereich bereits zu vernachlässigen ist und der kapazitive Widerstandswert von C_1 noch groß gegen den ohmschen Widerstand von 20 kΩ ist. Mit den angegebenen Werten der Tiefpaßschaltung erzielt man einen günstigen Kompromiß zwischen guter Störbefreiung, stabilem Halte- und großem Fangbereich. Es lassen sich relative Phasenfehler der Phasen-

synchronisierung kleiner als $\pm 5°$ und ein Fangbereich von mindestens 300 Hz erreichen. In der Abb. XI. 2. 3. ist neben dem Blockschaltbild die Verkopplung mit dem Farbsynchronsignal des Senders über die Regelcharakteristik des Phasendiskriminators und der Reaktanzstufe eingezeichnet. Der Phasendiskriminator liefert in unserem Beispiel bei negativer Phasendifferenz eine negative Regelspannung bzw. bei positiver Phasenabweichung eine positive Regelspannung. Die Reaktanzstufe wurde als kapazitiver Blindwiderstand gewählt, so daß eine positive Regelspannung

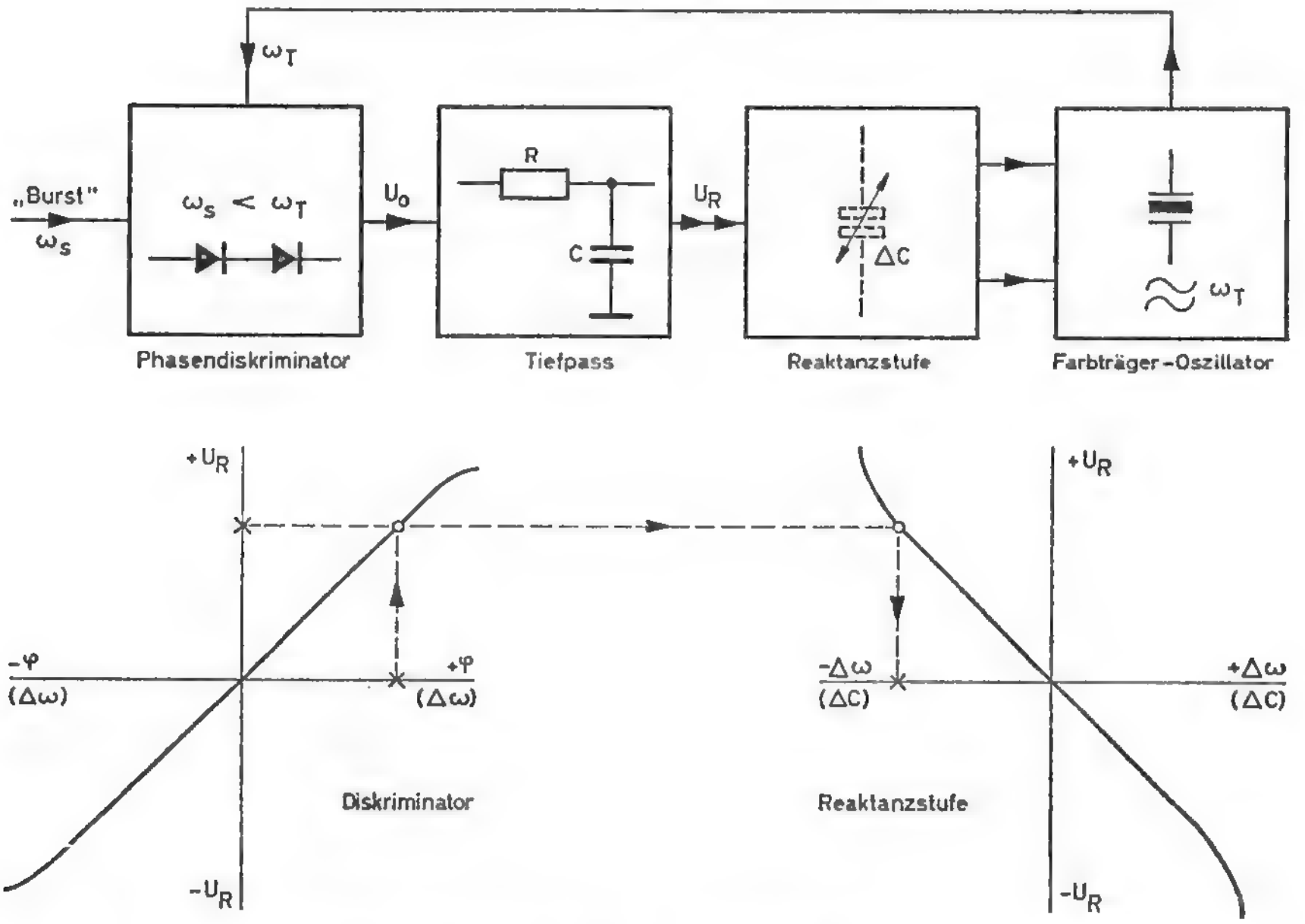


Abb. XI. 2. 3. Phasensynchronisierung des Farbträger-Oszillators über die Regelcharakteristik des Phasendiskriminators und der Reaktanzstufe.

eine größere Kapazität und damit eine negative Frequenzänderung zur Folge hat. Wenn also der Farbträgeroszillator seine Frequenz nach höheren Werten hin ändern will, so wird der Phasendiskriminator eine positive Regelspannung erzeugen, die an der Reaktanzstufe eine Vergrößerung der scheinbaren Kapazität zur Folge hat und damit die Frequenz des Farbträgeroszillators erniedrigt. Es wird also über die Regelschaltung des Phasendiskriminators jeder Frequenzänderung des Farbträgeroszillators entgegengewirkt und damit ein stabiler Arbeitspunkt bei richtiger Phasensynchronisierung mit dem Farbsynchronsignal des Senders sichergestellt.

Zusammenfassung

Um den Farbträgeroszillator des Empfängers mit dem Farbsynchronsignal des Senders synchronisieren zu können muß parallel zum Oszillatorkreis eine Reaktanzstufe angeordnet werden, deren Steilheit von der Regelspannung eines Phasendiskriminators verändert werden kann. Die Reaktanzstufe kann dabei entweder als induktiver oder aber als kapazitiver Blindwiderstand ausgebildet werden. Die scheinbare Kapazität bzw. Induktivität dieser Reaktanzstufe hängt direkt proportional von der Steilheit der Reaktanzröhre ab. Führt man daher dieser Reaktanzröhre die Regelspannung eines Phasendiskriminators zu, so kann man erreichen, daß der Farbträgeroszillator vom Farbsynchronsignal des Senders phasenstarr synchronisiert wird. Zu diesem Zweck muß der Phasendiskriminator aus der relativen Phasendifferenz zwischen Farbträgerschwingung und Farbsynchronsignal eine direkt proportionale Regelspannung erzeugen. Die Glättung und Störunterdrückung dieser Regelspannung nimmt ein Tiefpaß vor. Die Regelcharakteristiken des Phasendiskriminators und der Reaktanzstufe verkoppeln den Farbträgeroszillator mit dem Farbsynchronsignal des Senders und gewährleisten eine exakte Phasensynchronisierung.

KAPITEL XII

FARBBALKENSPANNUNGEN FÜR TEST- UND EINSTELLZWECKE

Übersicht

Es werden zwei Kombinationsmöglichkeiten angegeben, wie man Farbbalkenspannungen zusammensetzen kann, die für Test- und Einstellzwecke geeignet sind. Im ersten Fall werden die Farbbalkenspannungen aus den Primär- und Komplementärfarben aufgebaut und in ihrer Reihenfolge so angeordnet, daß man für das Leuchtdichtesignal U_Y eine treppenförmig ansteigende Spannung erhält. Ergänzt man diese Primär- und Komplementärfarben noch durch einen weißen und schwarzen Balken, so kommt man zu insgesamt 8 Balkenspannungen, die über eine Zeilenperiode verteilt ein Testmuster auf dem Bildschirm von 8 senkrechten Farbbalken erzeugen. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Benutzung der Farbdifferenzspannungen als Testsignale. Wählt man hierzu alle Kombinationen der möglichen Farbdifferenzspannungen, so kommt man zu insgesamt 12 verschiedenen Farbbalkenspannungen, die man gleichfalls so ordnen kann, daß eine treppenförmig ansteigende Leuchtdichtespannung U_Y erhalten wird. Für den Aufbau der verschiedenen Farbbalkenspannungen wird lediglich die amplitudenrichtige Zusammensetzung erklärt, ohne darauf einzugehen, in welcher Form man derartige Farbbalkenspannungen für die praktische Anwendung in Farbbalkengeneratoren verwenden kann. Der Aufbau der Farbbalkengeneratoren und die praktische Anwendung für die Einstellung und Justage wird in Band II „Schaltungstechnik und Serviceeinstellung“ näher erläutert und beschrieben.

Die Bestimmung und Festlegung der Farbbalkenspannungen stellt ein sehr gutes Mittel dar, zu überprüfen, ob man die Zusammensetzung der Farbdifferenzsignale, die in den ersten Kapiteln erläutert wurde, verstanden hat.

XII. 1. Farbbalken als Primär- und Komplementärfarben

Will man Farbbalkenspannungen für Test- und Einstellzwecke erzeugen, so liegt der einfachste Fall vor, wenn man die drei Primär- und Komplementärfarben hierfür benutzt.

In Kapitel III wurde erklärt, welche Amplituden und Phasenlagen diese

Primär- und Komplementärfarben, bezogen auf die beiden Modulationsachsen $(U_B - U_Y)'$ und $(U_R - U_Y)'$ haben. Die entsprechenden Werte sind in Abb. XII. 1. 1. nochmals dargestellt. Je ein Farbpaar, bestehend aus einer Primär- und der dazugehörigen Komplementärfarbe, ist gleich groß und besitzt entgegengesetzte Phasenlage. Ein derartiges Farbpaar ergänzt sich also jedesmal zur Farbe Weiß, wodurch die Farbmodulationsspannung Null und der Leuchtdichtewert 1 erhalten wird.

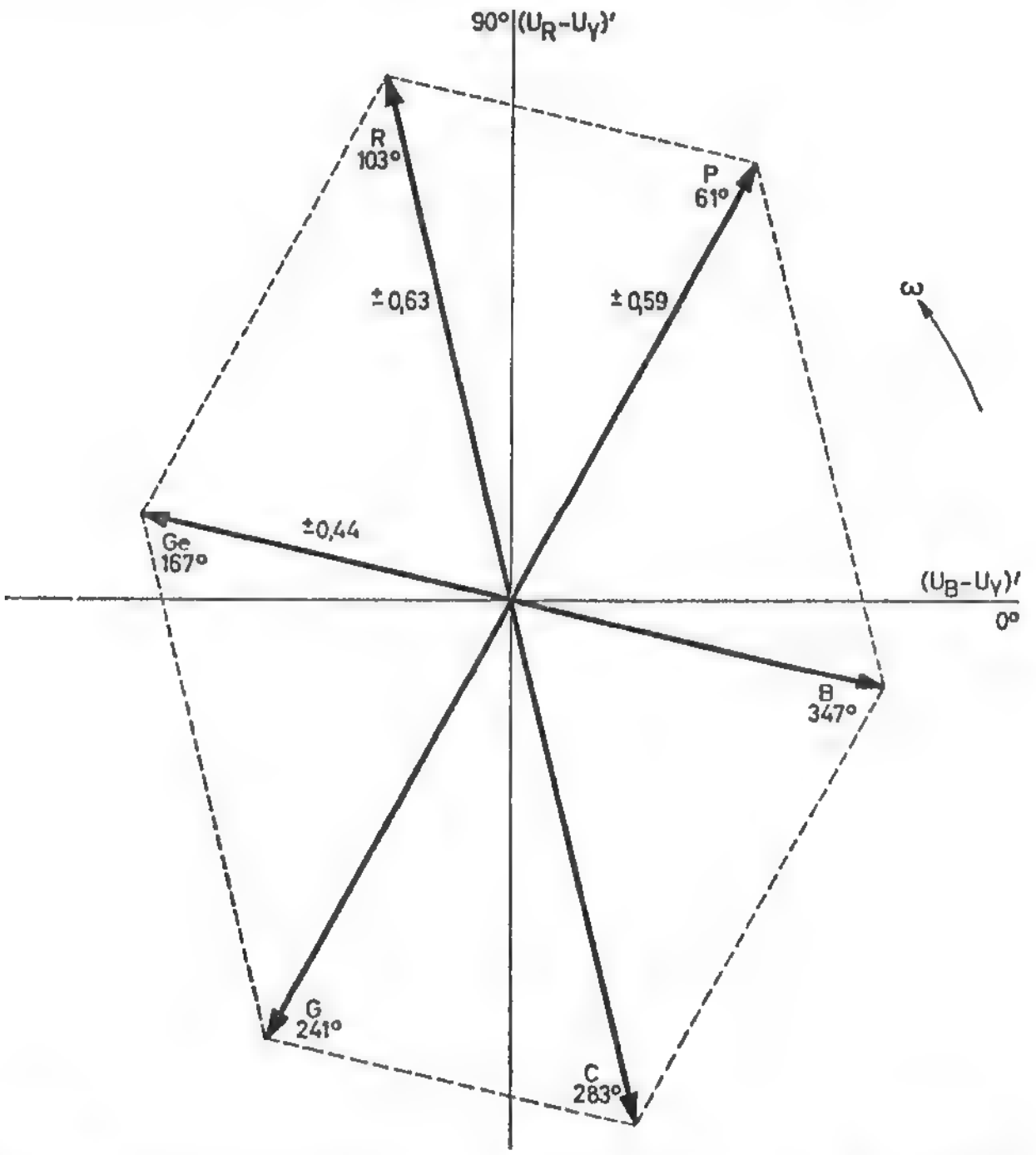


Abb. XII. 1. 1. Amplituden und Vektorlagen der drei Primär- und Komplementärfarben.

Will man neben diesen 6 verschiedenen Farben auch noch die Farbbalkenspannung Weiß und Schwarz verwenden, so kann man diese 8 Farbbalkenspannungen so kombinieren, daß für die Leuchtdichtespannung U_Y eine treppenförmig ansteigende Amplitude erhalten wird. Ordnet man diese 8 Farbbalkenspannungen als Modulationsspannung über eine Zeilenperiode an, so kann man hiermit ein vertikales Farbbalkenmuster auf dem Bildschirm erzeugen. Diese 8 Farbbalkenspannungen sind in der Abb. XII. 1. 2. eingezeichnet. Für die Festlegung des Leuchtdichtewertes U_Y gilt die Ausgangsgleichung:

$U_Y = 0{,}30\ U_R + 0{,}59\ U_G + 0{,}11\ U_B$.

Die Farbbalkenspannung Weiß erhält damit den Wert für die Leuchtdichte von 1,0. Die Komplementärfarbe Gelb besteht als Mischfarbe aus den beiden Primärfarben Rot und Grün und hat also den Leuchtdichtewert $U_Y = 0{,}30\ U_R + 0{,}59\ U_G = 0{,}89$. Für die Komplementärfarbe Cyan ergibt sich: $U_Y = 0{,}59\ U_G + 0{,}11\ U_B = 0{,}70$. Die grüne Farbe hat als Leuchtdichte den Wert 0,59, während die Komplementärfarbe Purpur aus den beiden Anteilen 0,30 U_R und 0,11 U_B besteht, also den Leuchtdichtewert 0,41 besitzt. Die rote und blaue Farbe haben als Leuchtdichtewert die Amplituden 0,30 bzw. 0,11.

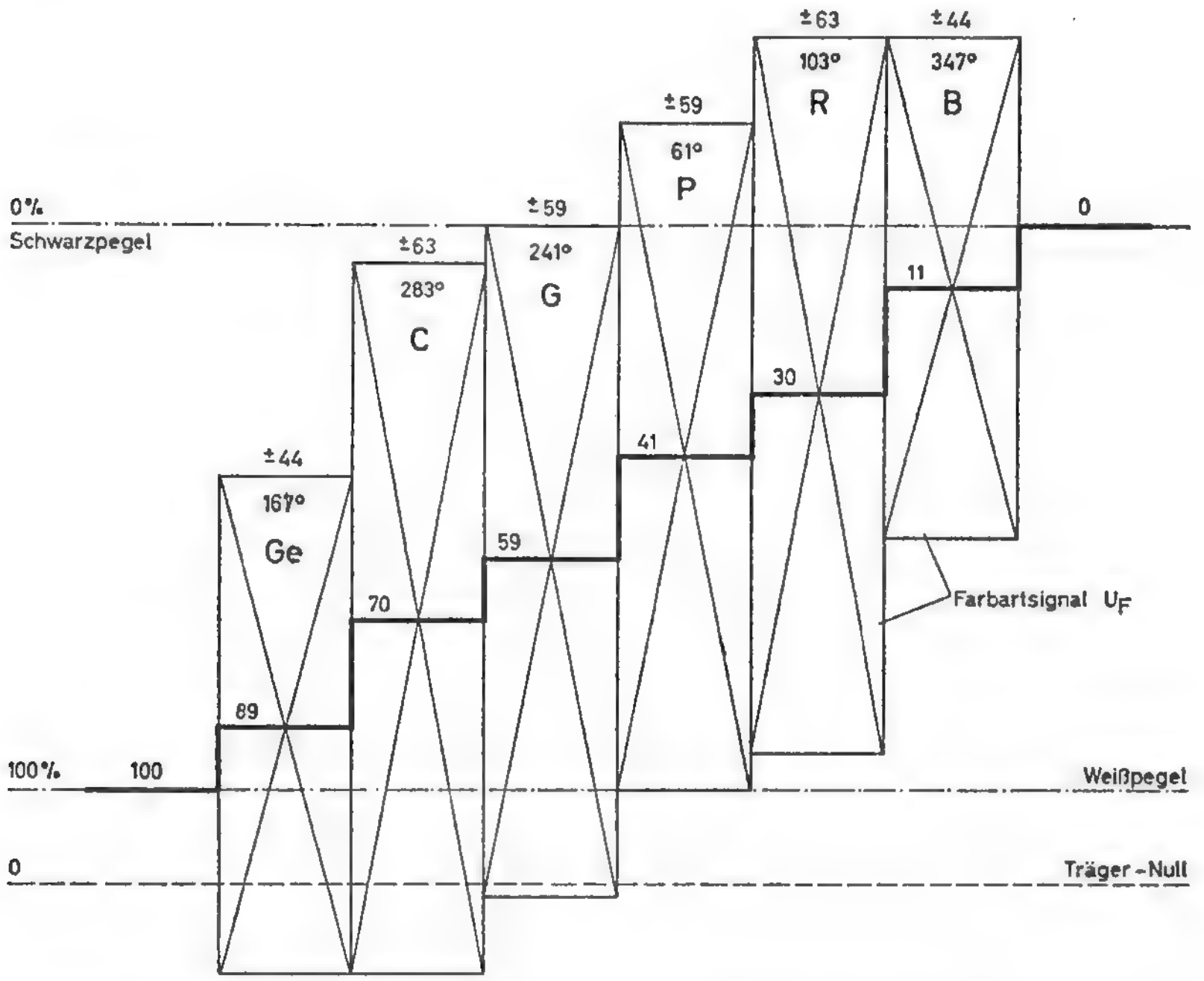


Abb. XII. 1. 2. Farbbalkenspannungen mit treppenförmig ansteigenden Leuchtdichtewerten.

Die dazugehörigen Amplituden des Farbartsignals U_F lassen sich vektoriell, wie ausführlich in Kapitel III und IV beschrieben, aus den beiden Amplituden der Farbdifferenzsignale $(U_B - U_Y)'$ und $(U_R - U_Y)'$ bestimmen. Die Ausgangsgleichung hierfür lautet:

$$U_F = \sqrt{(U_B - U_Y)'^2 + (U_R - U_Y)'^2}.$$

Die Ausrechnung dieser Werte im Einzelnen soll hier nicht wiederholt werden, da dies in Kapitel III und IV nachgelesen werden kann.

XII. 2. Farbbalken als Farbdifferenzspannungen

Neben den Farbbalken als Primär- und Komplementärfarben kann es für bestimmte Einstell- und Prüfzwecke sinnvoller sein, hierfür Farbdifferenzspannungen als Farbbalkenspannungen zur Verfügung zu haben. Zur Festlegung der Farbbalkenspannungen muß man davon ausgehen, daß die Farbdifferenzspannungen sich aus Anteilen der 3 Primärfarben zusammensetzen und damit in Richtung der Farbmodulationsachsen eine ganz bestimmte Mischfarbe darstellen. Durch geeignete Wahl der Zusammensetzung der drei Primärfarben erhält man also auf den Farbdifferenzachsen eine Spannungsamplitude, die als Farbbalkenspannung herangezogen werden kann.

Benutzt man alle Farbdifferenzachsen, so kann man hieraus insgesamt 12 verschiedene Farbbalkenspannungen ableiten. Auf jeder Farbdifferenzachse läßt sich in positiver und negativer Richtung je eine Farbbalkenspannung festlegen. Zu diesem Zweck kann man die Farbdifferenzachsen in drei rechtwinklig zueinander stehende Modulationsachspaare zusammenfassen. Es sind dies die Modulationsachspaare:
$(U_R - U_Y)'$ und $(U_B - U_Y)'$, U_I und U_Q sowie $(U_G - U_Y)'$ mit der rechtwinklig dazu liegenden Achse $(U_G - U_Y)' \mid \underline{90}°$. Da die Bestimmung dieser Farbbalkenspannungen sehr dazu geeignet ist, das Verständnis für die Zusammensetzung des Farbartsignals zu vertiefen, soll nachfolgend für alle 12 Möglichkeiten die Farbbalkenspannung errechnet werden, ohne Rücksicht darauf, in welcher Form man derartige Spannungen für die praktische Anwendung in Farbbalkengeneratoren am besten erzeugen und kombinieren könnte. Die praktische Ausführung und Nutzanwendung von Farbbalkengeneratoren wird im Einzelnen im Band II „Schaltungstechnik und Serviceeinstellungen" näher erläutert und beschrieben.

Für die Bestimmung der einzelnen Farbbalkenspannungen muß davon ausgegangen werden, daß in der Richtung der Modulationsachse eine Farbdifferenzspannung als Mischfarbe vorhanden sein muß. Dies ist am einfachsten zu erreichen, wenn die Mischfarbe nur aus zwei Primärfarben besteht. Gleichzeitig muß dann die Bedingung erfüllt sein, daß die rechtwinklig dazu liegende Farbdifferenzspannung Null ist. Beginnen wir zunächst mit der Bestimmung der Farbbalkenspannung auf der $(U_B - U_Y)'$-Achse. Die Mischfarbe auf dieser Achse läßt sich aus den Primärfarben Blau und Rot zusammensetzen. Dies ist in der Abb. XII. 2. 1. eingezeichnet. Es muß daher sowohl die Primärfarbe Grün als auch die Farbdifferenz-

spannung $(U_R - U_Y)'$ Null sein. Für die Bestimmung der Amplitudengrößen gelten die beiden Ausgangsgleichungen:

$$(U_R - U_Y)' = 0{,}62\ U_R - 0{,}52\ U_G - 0{,}10\ U_B$$

$$(U_B - U_Y)' = -0{,}15\ U_R - 0{,}29\ U_G + 0{,}44\ U_B.$$

Bei der Festlegung $U_G = 0$ und $(U_R - U_Y)' = 0$ ergibt sich:

$$(U_R - U_Y)' = 0{,}62\ U_R - 0{,}10\ U_B = 0.$$

Damit diese Bedingung erfüllt ist, muß die Spannung U_R um den Faktor 0,10/0,62 reduziert werden. Für die Modulationsspannung $(U_B - U_Y)'$ erhält man dann:

$$(U_B - U_Y)' = -0{,}15 \cdot 0{,}10/0{,}62\ U_R + 0{,}44\ U_B$$

$$= -0{,}03 + 0{,}44 = 0{,}41.$$

In der Abb. XII. 2. 1. ist die reduzierte Amplitude der Farbspannung U_R mit U_R' bezeichnet und man erkennt, daß die vektorielle Addition der

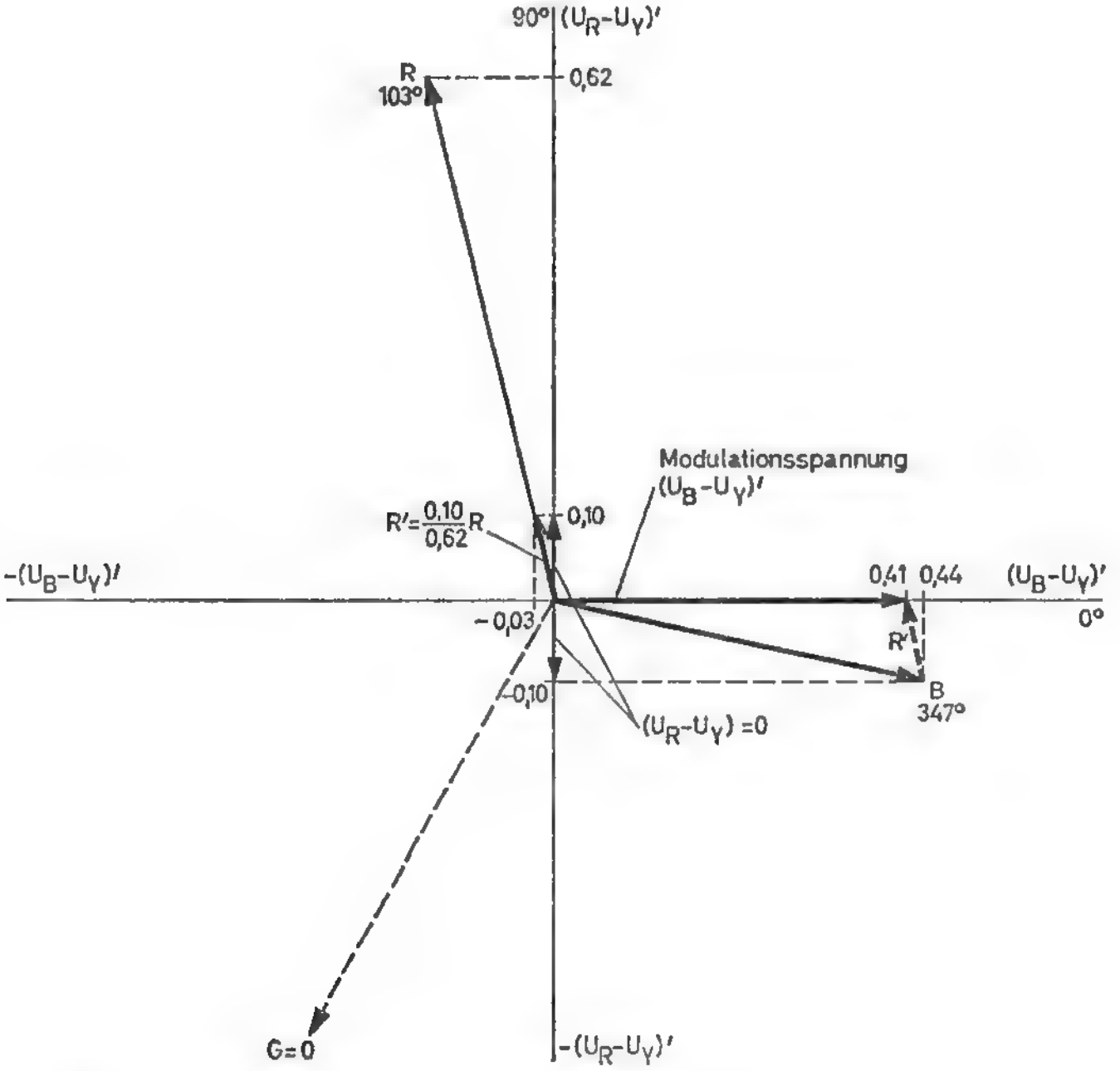


Abb. XII. 2. 1. Zusammensetzung der Farbbalkenspannung $(U_B - U_Y)'$.

Farbspannung U_B und U_R' als Modulationsspannung $(U_B - U_Y)'$ eine Amplitude von 0,41 ergibt. Der dazugehörige Leuchtdichtewert U_Y für diese Modulationsspannung $(U_B - U_Y)' = 0{,}41$ ergibt sich aus:

$$U_Y = 0{,}30 \cdot 0{,}10/0{,}62\, U_R + 0{,}11\, U_B = 0{,}05 + 0{,}11 = 0{,}16.$$

In der gleichen Weise kann man jetzt die Modulationsspannung für die $-(U_B - U_Y)'$-Achse bestimmen. Die Modulationsspannung setzt sich aus den beiden Primärfarben Grün und Rot zusammen, so daß die Primärfarbe Blau und die Farbdifferenzspannung $(U_R - U_Y)'$ Null sein muß.

Man erhält hierfür also:

$$(U_R - U_Y)' = 0{,}62\, U_R - 0{,}52\, U_G = 0.$$

Die Verkleinerung der Farbspannung U_R muß um den Faktor 0,52/0,62 vorgenommen werden. Die Modulationsspannung beträgt damit:

$$-(U_B - U_Y)' = 0{,}15 \cdot 0{,}52/0{,}62\, U_R + 0{,}29\, U_G = 0{,}12 + 0{,}29 = 0{,}41.$$

Die vektorielle Addition der Farbspannung Grün mit der reduzierten Farb-

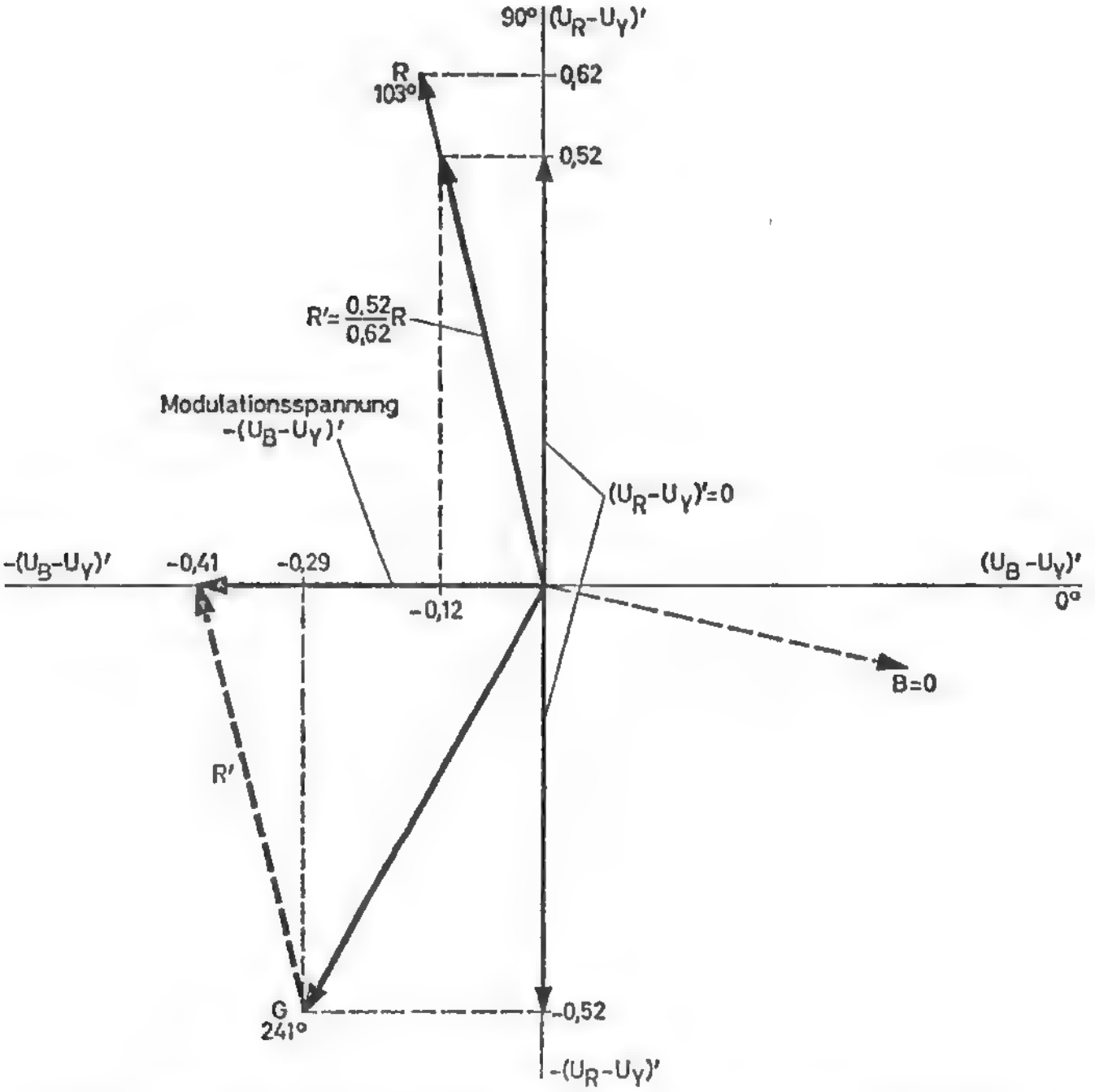


Abb. XII. 2. 2. Zusammensetzung der Farbbalkenspannung $-(U_B - U_Y)'$.

spannung Rot zur Modulationsspannung —$(U_B$ — $U_Y)'$ ist in Abb. XII. 2. 2. eingetragen. Der entsprechende Leuchtdichtewert ergibt sich aus: $U_Y = 0{,}30 \cdot 0{,}52/0{,}62\ U_R + 0{,}59\ U_G = 0{,}25 + 0{,}59 = 0{,}84$.

Man sieht, daß die Modulationsamplituden der beiden gegenphasigen Farbdifferenzspannungen gleich groß sind und daß die Summe der beiden Leuchtdichtewerte 1 ergibt, genauso wie bei einem Farbpaar, bestehend aus Primär- und Komplementärfarbe, wo sich die beiden gegenphasigen Spannungen bei gleicher Amplitude zu Weiß ergänzen.

Bei der Festlegung der Farbbalkenspannung $(U_R$ — $U_Y)'$ muß man davon ausgehen, daß die Farbdifferenzspannung $(U_B$ — $U_Y)'$ Null sein muß, genauso wie die Primärfarbe Grün. Es muß also gelten:

$$(U_B - U_Y)' = -0{,}15\ U_R + 0{,}44\ U_B = 0.$$

Die Farbspannung U_B wird um den Faktor 0,15/0,44 verkleinert. Daraus ergibt sich:

$$(U_R - U_Y)' = 0{,}62\ U_R - 0{,}10 \cdot 0{,}15/0{,}44\ U_B = 0{,}62 - 0{,}04 = 0{,}58.$$

Der Leuchtdichtewert beträgt:

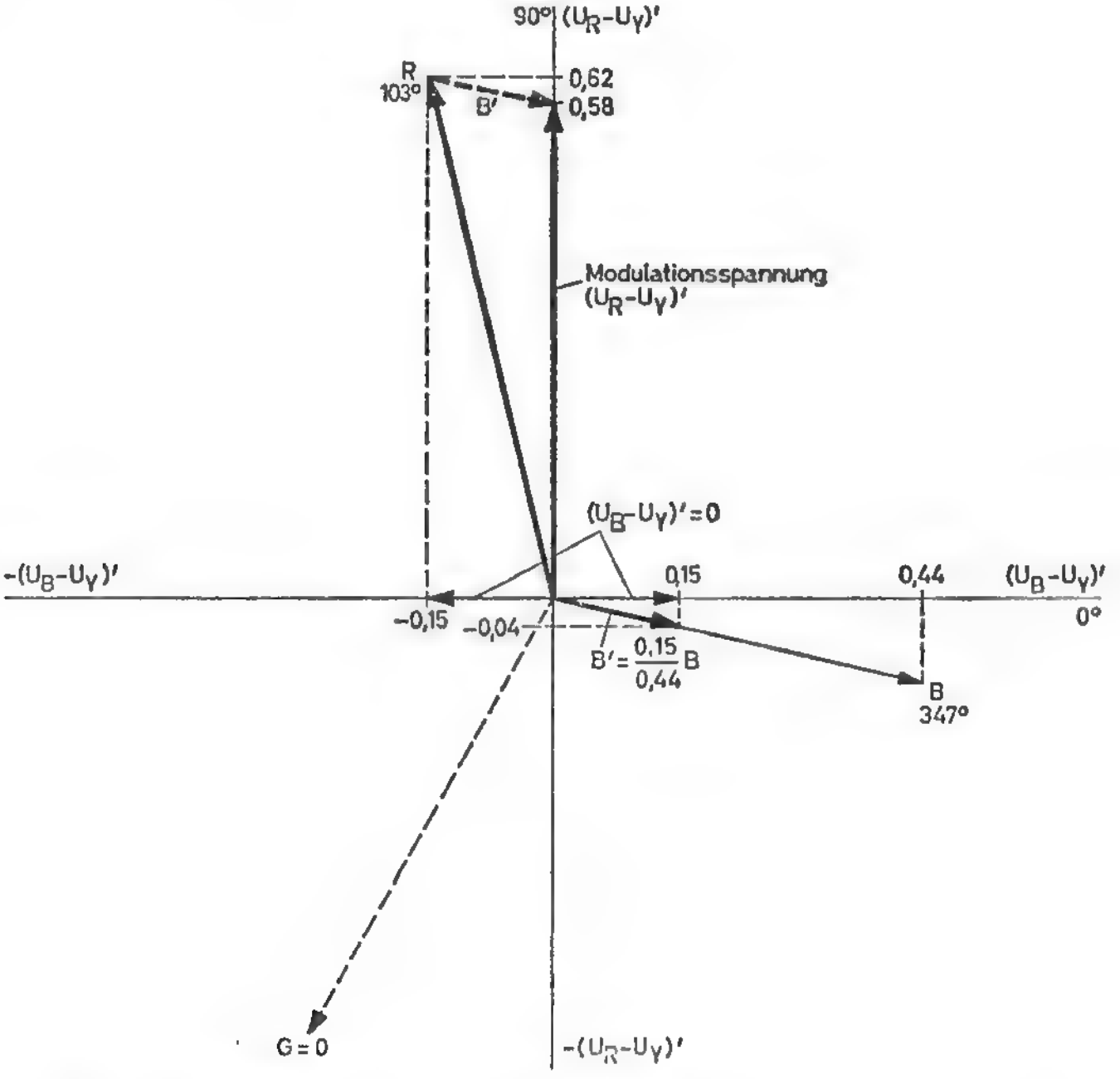


Abb. XII. 2. 3. Zusammensetzung der Farbbalkenspannung $(U_R$ — $U_Y)'$.

$$U_Y = 0{,}30\ U_R + 0{,}11 \cdot 0{,}15/0{,}44\ U_B = 0{,}30 + 0{,}04 = 0{,}34.$$

Die vektorielle Addition dieser Modulationsspannung ist in Abb. XII. 2. 3. eingezeichnet.

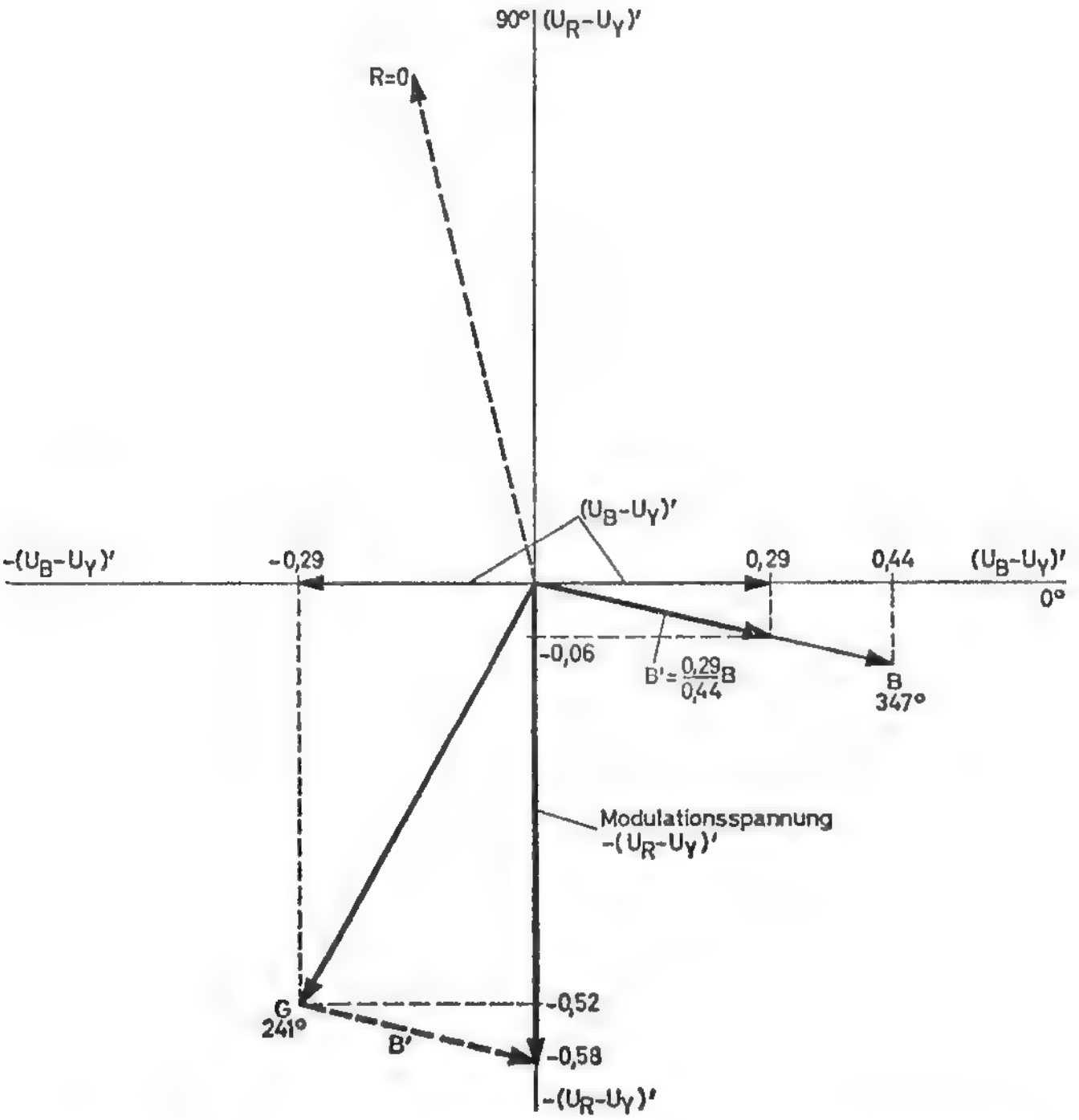


Abb. XII. 2. 4. Zusammensetzung der Farbbalkenspannung $-(U_R - U_Y)'$.

Die gegenphasige Farbbalkenspannung $-(U_R - U_Y)'$ setzt sich aus den Primärfarben Grün und Blau zusammen. Es gilt damit:

$$(U_B - U_Y)' = -0{,}29\ U_G + 0{,}44\ U_B = 0.$$

Die Farbspannung Blau muß um den Faktor 0,29/0,44 verkleinert werden. Dies ergibt für die Modulationsspannung folgenden Wert:

$$-(U_R - U_Y)' = 0{,}52\ U_G + 0{,}10 \cdot 0{,}29/0{,}44\ U_B = 0{,}52 + 0{,}06 = 0{,}58.$$

Der entsprechende Leutdichtewert ist:

$$U_Y = 0{,}59\ U_G + 0{,}11 \cdot 0{,}29/0{,}44\ U_B = 0{,}59 + 0{,}07 = 0{,}66.$$

Aus der Abb. XII. 2. 4. ist der Aufbau Modulationsspannung $-(U_R - U_Y)'$ aus den Teilkomponenten U_G und U_B' zu erkennen.

Als nächste Gruppe sollen die Farbbalkenspannungen für die Modulationsachsen U_Q und U_I festgelegt werden. Die hierfür benötigten Ausgangsgleichungen sind:

$$U_I = 0{,}60\, U_R - 0{,}28\, U_G - 0{,}32\, U_B$$

$$U_Q = 0{,}21\, U_R - 0{,}52\, U_G + 0{,}31\, U_B.$$

Für die Modulationsspannung U_Q muß die Farbspannung Grün und die Farbdifferenzspannung U_I Null sein. Dies ergibt:

$$U_I = 0{,}60\, U_R - 0{,}32\, U_B = 0.$$

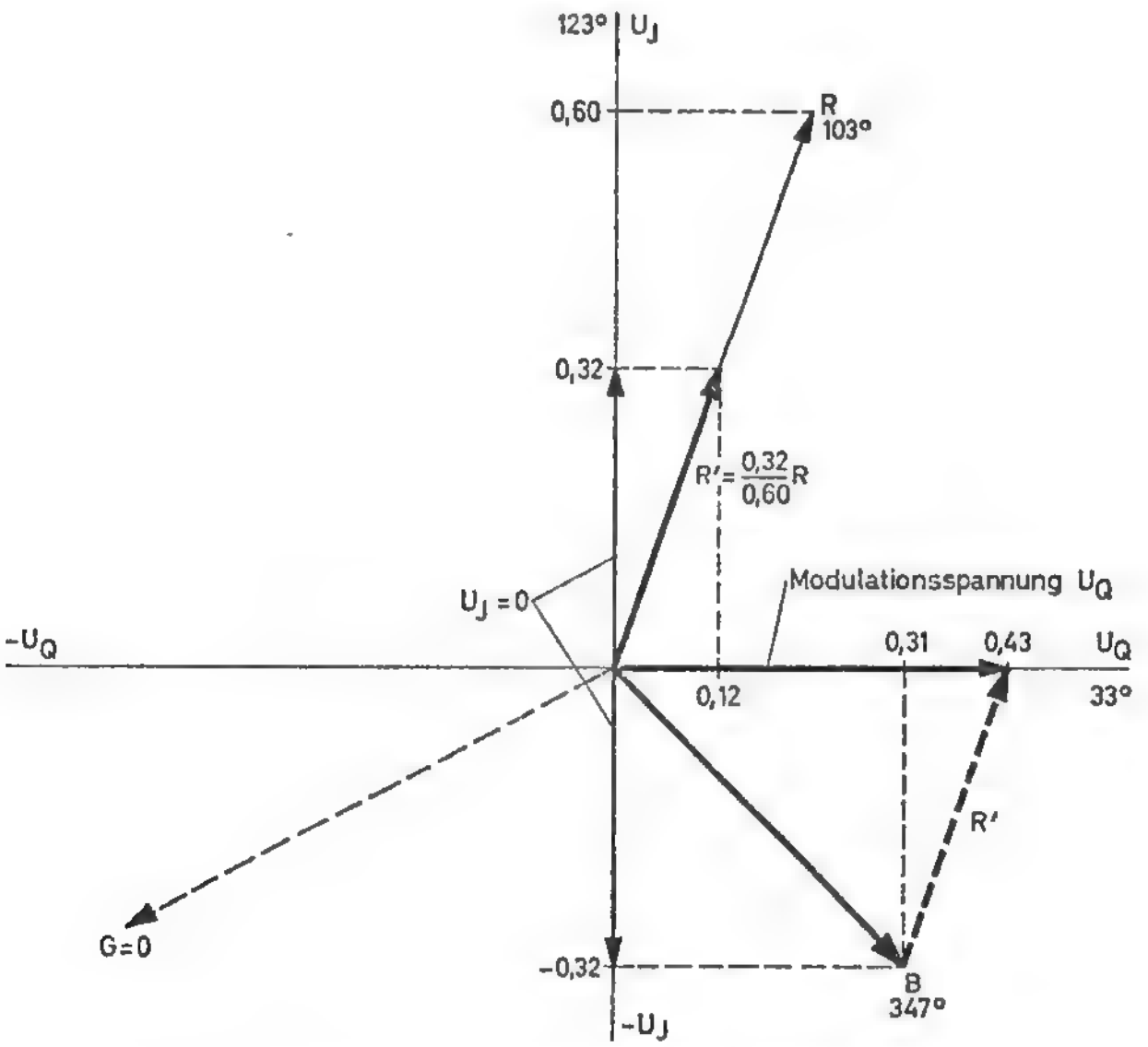


Abb. XII. 2. 5. Zusammensetzung der Farbbalkenspannung U_Q.

Die Farbspannung Rot muß also um den Faktor 0,32/0,60 verkleinert werden. Daraus erhält man:

$$U_Q = 0{,}21 \cdot 0{,}32/0{,}60\, U_R + 0{,}31\, U_B = 0{,}12 + 0{,}31 = 0{,}43.$$

Für den Leuchtdichtewert ergibt sich:

$$U_Y = 0{,}30 \cdot 0{,}32/0{,}60\, U_R + 0{,}11\, U_B = 0{,}16 + 0{,}11 = 0{,}27.$$

Die Modulationsamplitude für die Farbbalkenspannung U_Q, aufgebaut aus den Komponenten U_B und U_R' ist in Abb. XII. 2. 5. eingezeichnet.

Die in Gegenphase liegende Modulationsspannung $-U_Q$ setzt sich aus den beiden Primärfarben Grün und Rot zusammen, so daß die Farbe Blau und U_I Null sein müssen. Somit ergibt sich:

$$U_I = 0{,}60\ U_R - 0{,}28\ U_G = 0.$$

Die Verkleinerung der Farbspannung U_R muß also mit dem Faktor 0,28/0,60 vorgenommen werden:

$$-U_Q = -0{,}21 \cdot 0{,}28/0{,}60\ U_R + 0{,}52\ U_G = -0{,}09 + 0{,}52 = 0{,}43.$$

$$U_Y = 0{,}30 \cdot 0{,}28/0{,}60\ U_R + 0{,}59\ U_G = 0{,}14 + 0{,}59 = 0{,}73$$

Das Vektordiagramm für die Farbbalkenspannung $-U_Q$ gibt Abb. XII. 2. 6. wieder.

Die Modulationsspannung U_I läßt sich aus den Farben Rot und Grün zusammensetzen, so daß die Farbe Blau und die Farbdifferenzspannung U_Q Null sein müssen. Dies ergibt: $U_Q = 0{,}21\ U_R - 0{,}52\ U_G = 0$. Damit muß die Farbspannung U_G um den Faktor 0,21/0,52 verkleinert werden.

$$U_I = 0{,}60\ U_R - 0{,}28 \cdot 0{,}21/0{,}52\ U_G = 0{,}60 - 0{,}11 = 0{,}49.$$

$$U_Y = 0{,}30\ U_R + 0{,}59 \cdot 0{,}21/0{,}52\ U_G = 0{,}30 + 0{,}24 = 0{,}54.$$

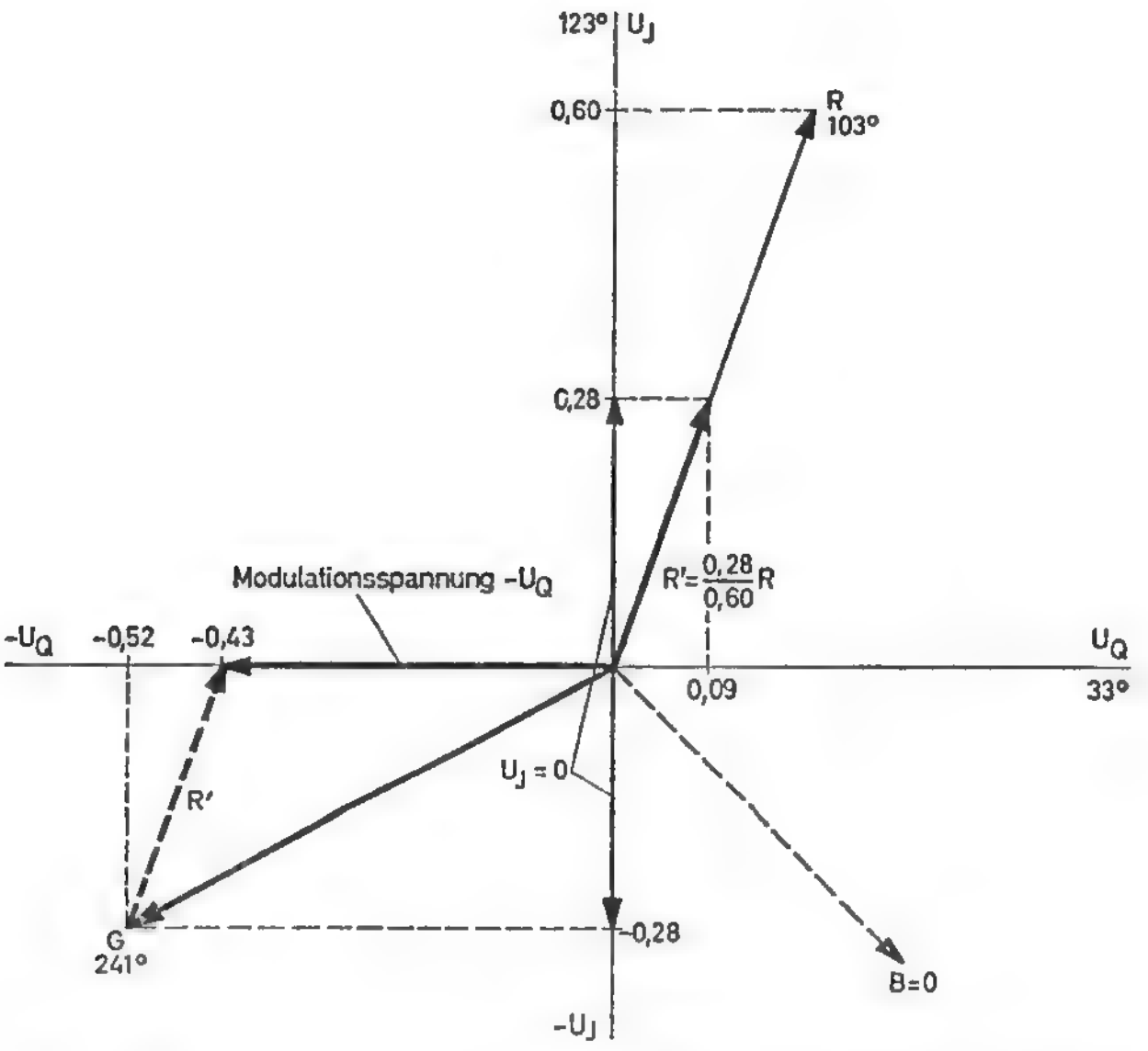


Abb. XII. 2. 6. Zusammensetzung der Farbbalkenspannung $-U_Q$.

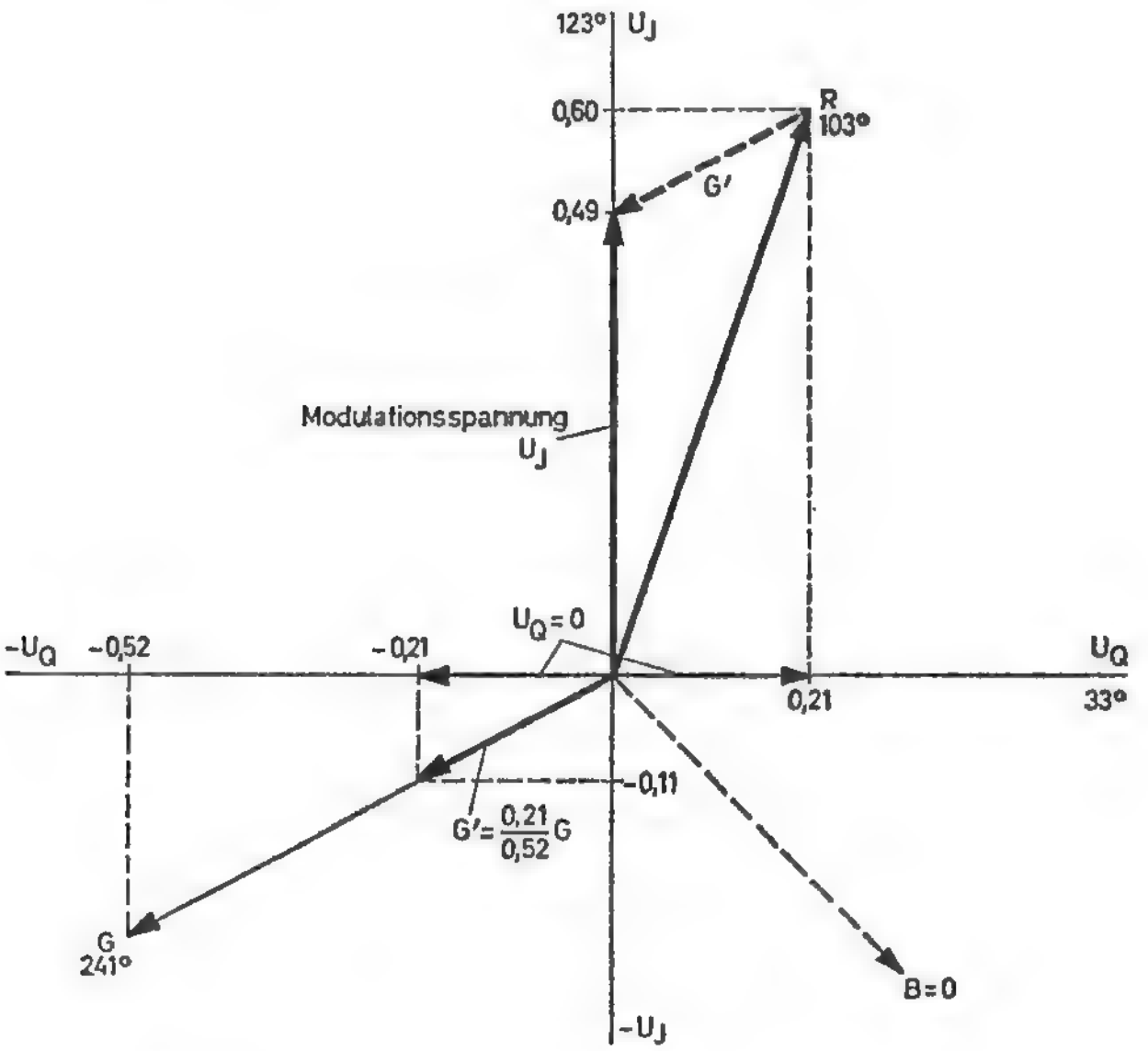


Abb. XII. 2. 7. Zusammensetzung der Farbbalkenspannung U_I.

Die hierfür geltenden Beziehungen sind in Abb. XII. 2. 7. eingezeichnet Aus den Primärfarben Grün und Blau kann man die gegenphasige Modulationsspannung $-U_I$ zusammensetzen. Es muß daher die Farbe Rot und U_Q Null sein.

$$U_Q = -0{,}52\, U_G + 0{,}31\, U_B = 0.$$

Die Farbspannung U_G muß also um den Faktor 0,31/0,52 verkleinert werden.

$$-U_I = 0{,}28 \cdot 0{,}31/0{,}52\, U_G + 0{,}32\, U_B = 0{,}17 + 0{,}32 = 0{,}49$$

$$U_Y = 0{,}59 \cdot 0{,}31/0{,}52\, U_G + 0{,}11\, U_B = 0{,}35 + 0{,}11 = 0{,}46.$$

Aus Abb. XII. 2. 8. ist der vektorielle Aufbau dieser Farbbalkenspannung ersichtlich.

Als letzte Gruppe sollen auch noch die je zwei möglichen Farbbalkenspannungen für die $(U_G - U_Y)'$-Achse, sowie für die rechtwinklig dazu liegende Achse, die wir als $(U_G - U_Y)' \mid 90°$-Achse bezeichnen wollen, bestimmt werden.

Obgleich die $(U_G - U_Y)'$-Modulationsspannung vom Sender nicht mitausgestrahlt wird, kann diese Spannung für Prüfzwecke im Empfänger

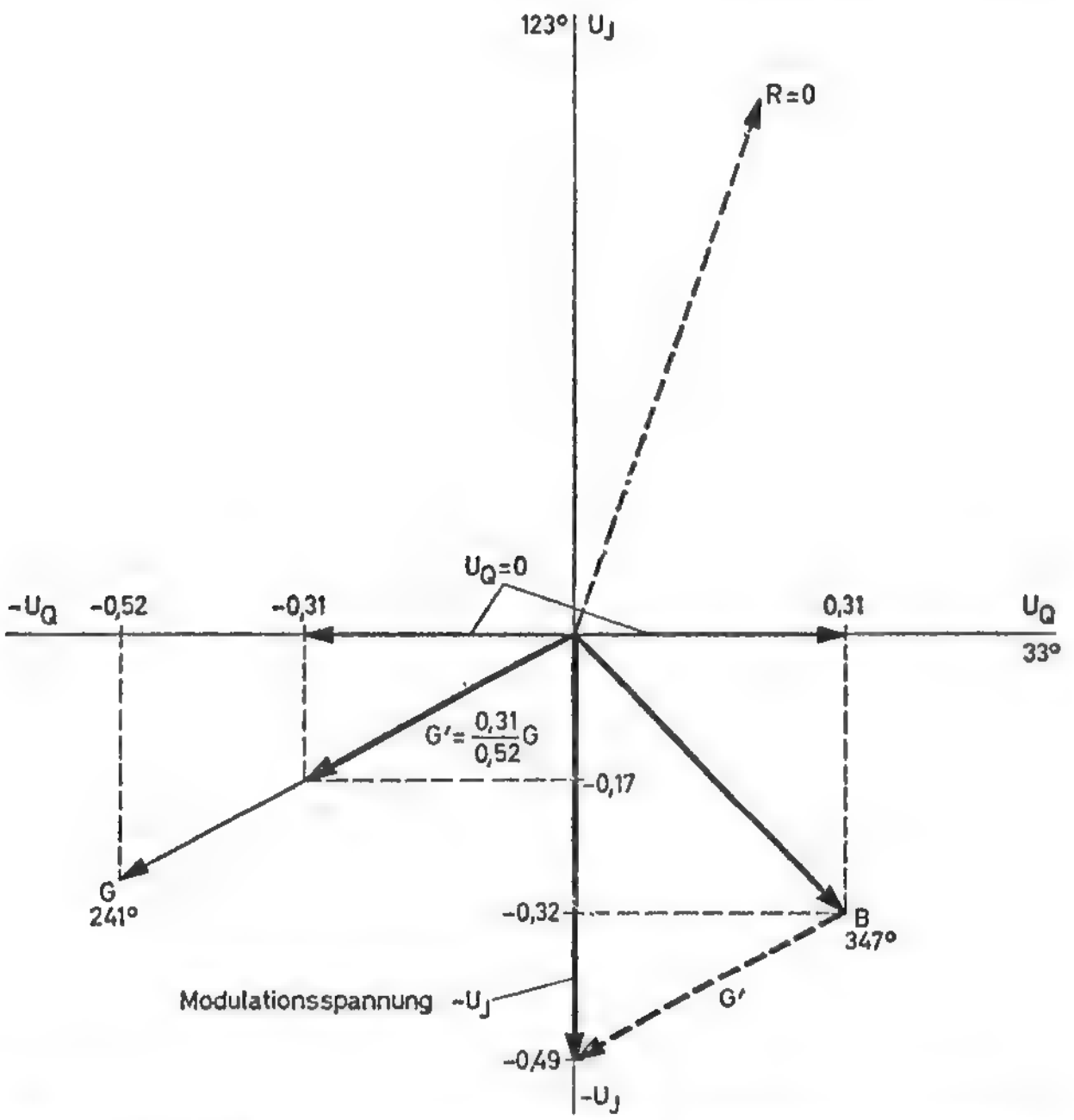


Abb. XII. 2. 8. Zusammensetzung der Farbbalkenspannung $-U_I$.

herangezogen werden, da an den Steuergittern der Dreifarben-Lochmaskenröhre neben den beiden Farbdifferenzspannungen $(U_B - U_Y)$ und $(U_R - U_Y)$ auch die $(U_G - U_Y)$-Spannung vorhanden sein muß. Um die $(U_G - U_Y)'$-Farbbalkenamplituden bestimmen zu können, muß die dazu um 90° versetzte Modulationsspannung bekannt sein. Es soll deshalb der Vollständigkeit halber auch die Farbdifferenzspannung $(U_G - U_Y)' \mid \underline{90°}$ mit angegeben werden. Die beiden Ausgangsgleichungen für diese Modulationsspannungen lauten:

$$(U_G - U_Y)' = -0{,}43\, U_R + 0{,}59\, U_G - 0{,}16\, U_B$$

$$(U_G - U_Y)' \mid 90° = 0{,}46\, U_R - 0{,}04\, U_G - 0{,}42\, U_B.$$

Um die auf der $(U_G - U_Y)' \mid 90°$-Modulationsachse liegenden Primärfarbanteile zu bestimmen, muß man davon ausgehen, daß für jede Primärfarbe gilt:

$$U_F = \sqrt{(U_G - U_Y)'^2 + (U_G - U_Y)'} \mid \underline{90°}.$$

Setzt man für U_F sowie für $(U_G - U_Y)'$ die bekannten Werte der drei

Primärfarben ein, so erhält man die entsprechenden Anteile auf der $(U_G - U_Y)' \mid 90°$-Modulationsachse.

Die Farbbalkenspannung $(U_G - U_Y)'$ läßt sich aus den Farben Grün und Rot zusammensetzen, wobei die Farbspannung Blau und die Modulationsspannung $(U_G - U_Y)' \mid \underline{90°}$ Null sein müssen. Dies ergibt:

$$(U_G - U_Y)' \mid \underline{90°} = 0{,}46\, U_R - 0{,}04\, U_G = 0.$$

Die Farbspannung Rot wird also um den Faktor 0,04/0,46 verkleinert.

$$(U_G - U_Y)' = -0{,}43 \cdot 0{,}04/0{,}46\, U_R + 0{,}59\, U_G$$

$$= -0{,}04 + 0{,}59 = 0{,}55$$

$$U_Y = 0{,}30 \cdot 0{,}04/0{,}46\, U_R + 0{,}59\, U_G = 0{,}03 + 0{,}59 = 0{,}62.$$

Die dazu gehörige Vektordarstellung ist in Abb. XII. 2. 9. angegeben.

Die gegenphasige Farbbalkenspannung $-(U_G - U_Y)'$ ergibt sich aus der Zusammensetzung der Farbspannungen Blau und Rot, wobei die Farbe Grün und $(U_G - U_Y)' \mid \underline{90°}$ wiederum Null sein muß.

$$(U_G - U_Y)' \mid \underline{90°} = 0{,}46\, U_R - 0{,}42\, U_B = 0.$$

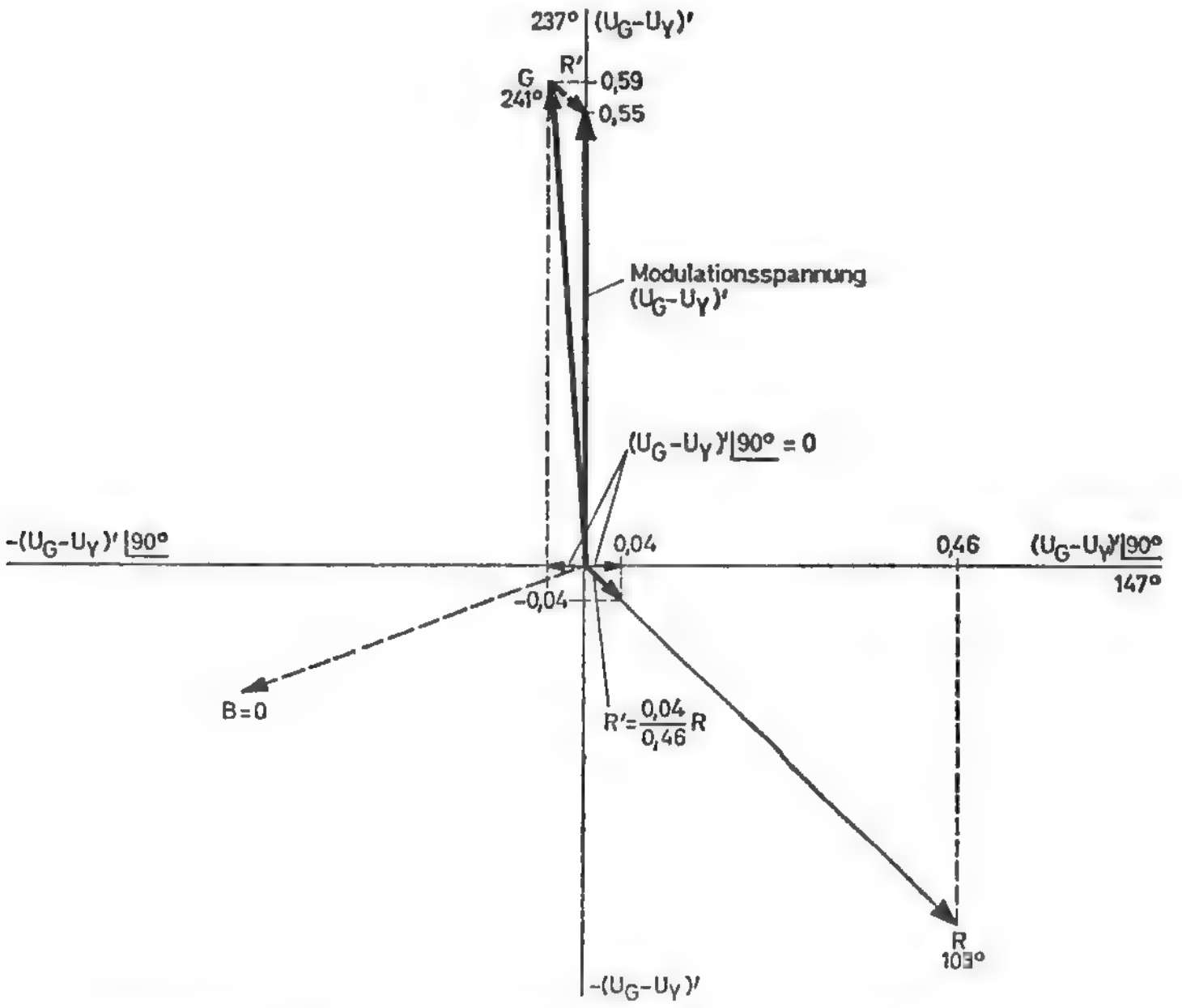


Abb. XII. 2. 9. Zusammensetzung der Farbbalkenspannung $(U_G - U_Y)'$.

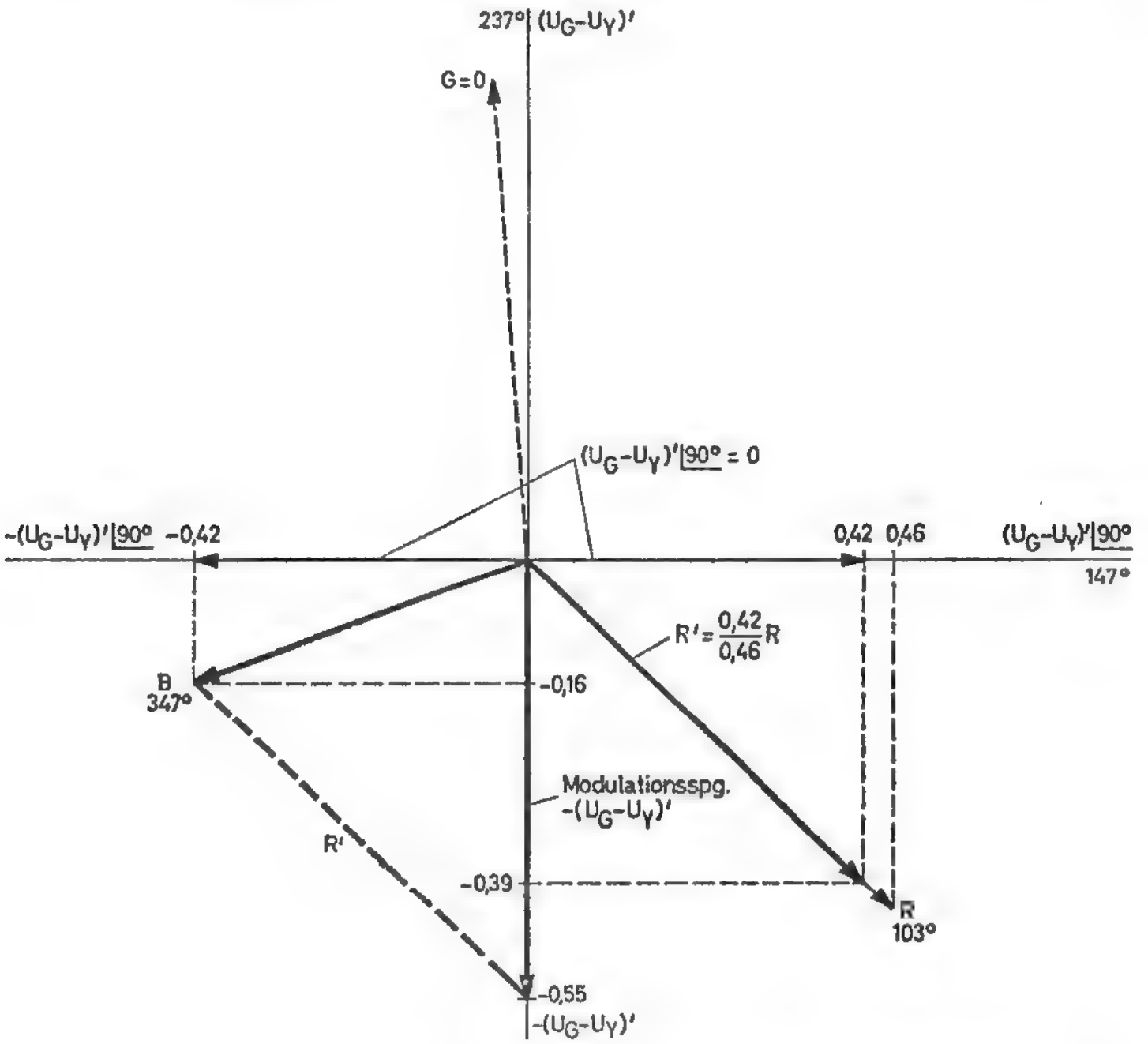


Abb. XII. 2. 10. Zusammensetzung der Farbbalkenspannung $-(U_G - U_Y)'$.

Die Farbamplitude Rot wird also um den Faktor 0,42/0,46 verkleinert.

$$-(U_G - U_Y)' = 0{,}43 \cdot 0{,}42/0{,}46\, U_R + 0{,}16\, U_B = 0{,}39 + 0{,}16 = 0{,}55.$$

$$U_Y = 0{,}30 \cdot 0{,}42/0{,}46\, U_R + 0{,}11\, U_B = 0{,}27 + 0{,}11 = 0{,}38.$$

Die Abb. XII. 2. 10. zeigt den Aufbau dieser Farbbalkenspannung.

Für die beiden Modulationsspannungen $(U_G - U_Y)' \mid 90°$ ergeben sich die aus den Abb. XII. 2. 11. und XII. 2. 12. abzulesenden Werte:

$$(U_G - U_Y)' = -0{,}43\, U_R + 0{,}59\, U_G = 0.$$

$$U_G' = 0{,}43/0{,}59\, U_G$$

$$(U_G - U_Y)' \mid \underline{90}° = 0{,}46\, U_R - 0{,}04 \cdot 0{,}43/0{,}59\, U_G$$

$$= 0{,}46 - 0{,}03 = 0{,}43$$

$$U_Y = 0{,}30\, U_R + 0{,}59 \cdot 0{,}43/0{,}59\, U_G = 0{,}30 + 0{,}43 = 0{,}73.$$

$$(U_G - U_Y)' = 0{,}59\, U_G - 0{,}16\, U_B = 0.$$

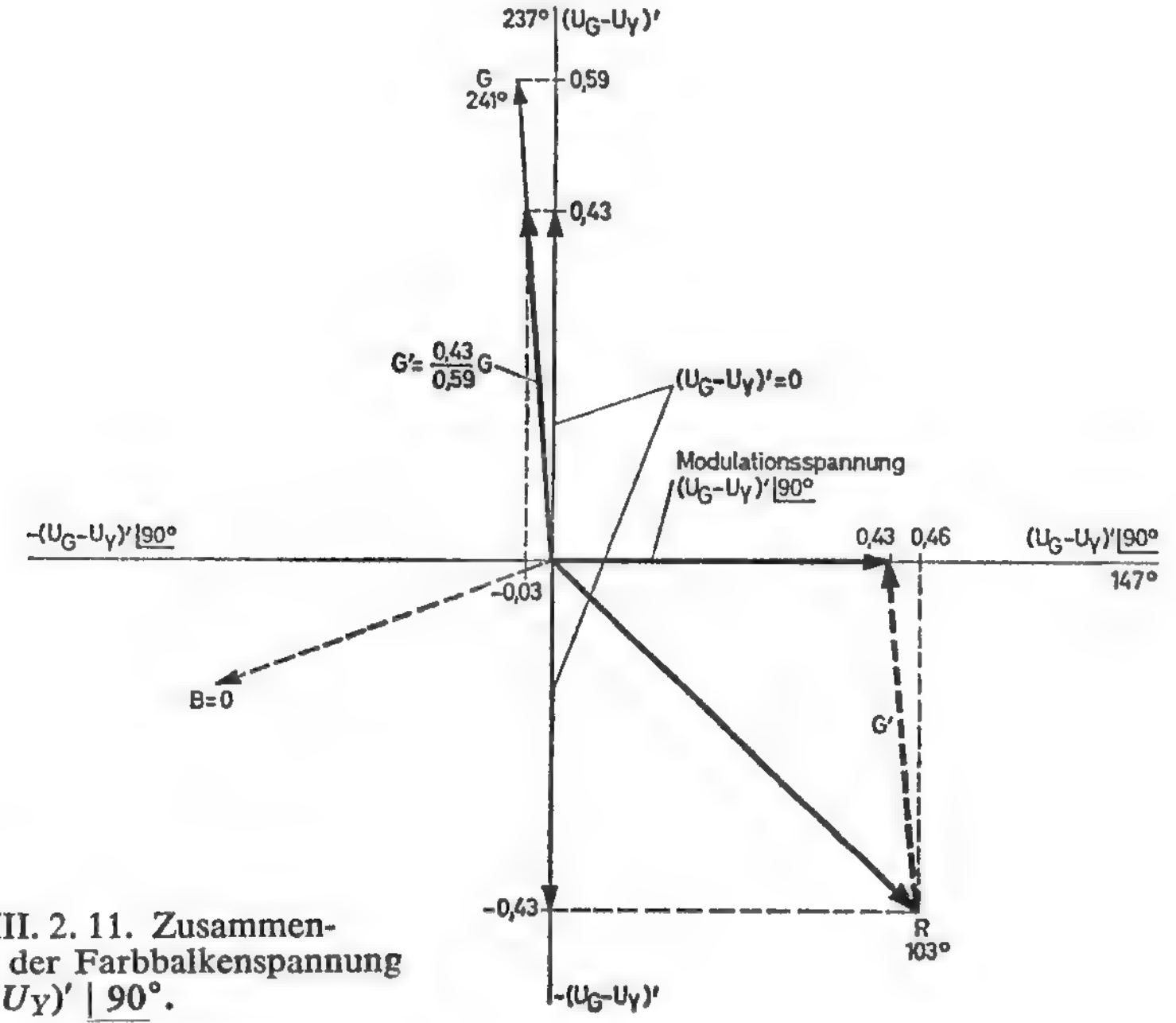


Abb. XII. 2. 11. Zusammensetzung der Farbbalkenspannung $(U_G - U_Y)' \mid 90°$.

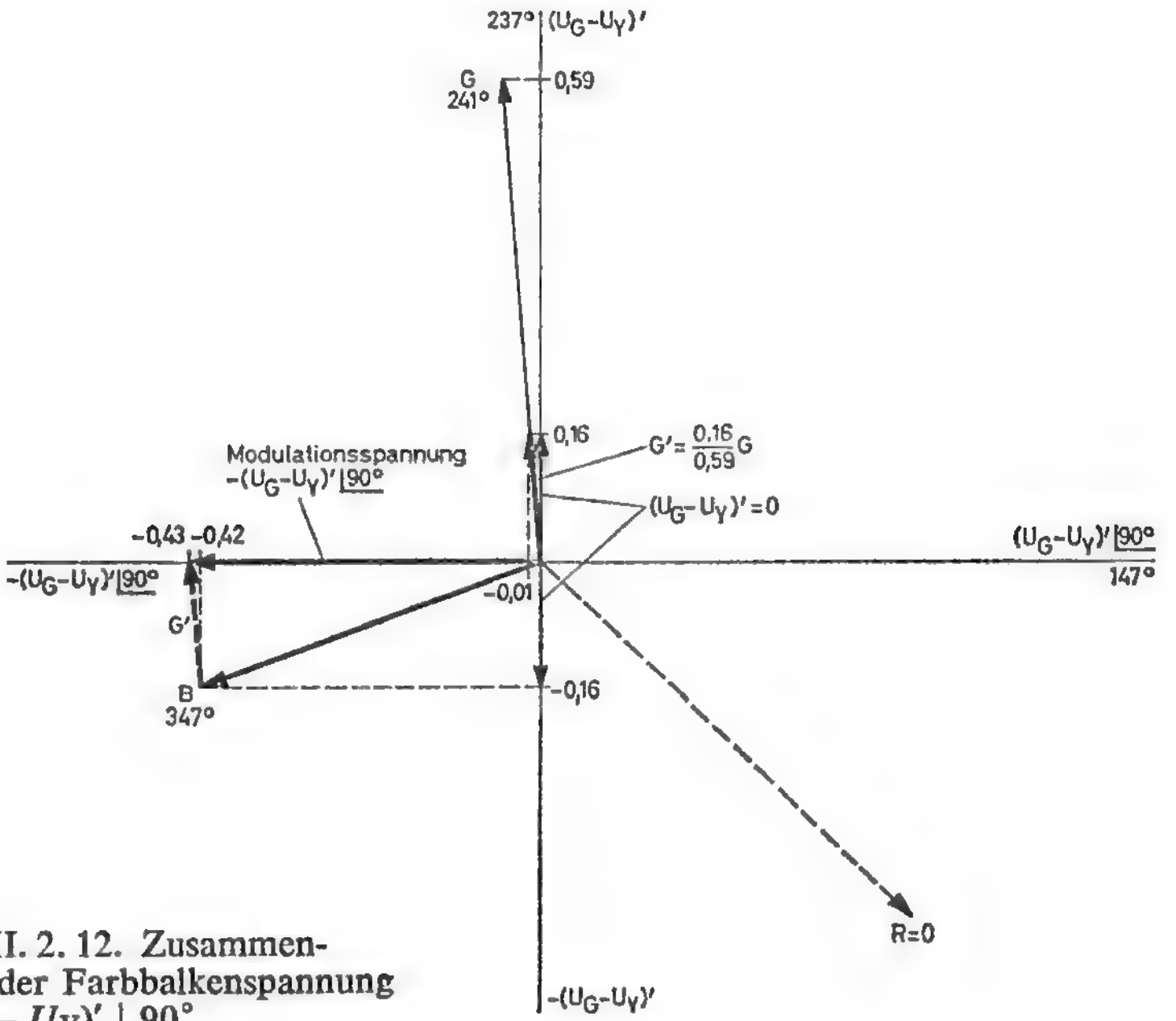


Abb. XII. 2. 12. Zusammensetzung der Farbbalkenspannung $-(U_G - U_Y)' \mid 90°$.

$$U_G' = 0{,}16/0{,}59\ U_G$$

$$-(U_G - U_Y)' \mid 90° = 0{,}04 \cdot 0{,}16/0{,}59\ U_G + 0{,}42\ U_B$$

$$= 0{,}01 + 0{,}42 = 0{,}43$$

$$U_Y = 0{,}59 \cdot 0{,}16/0{,}59\ U_G + 0{,}11\ U_B = 0{,}16 + 0{,}11 = 0{,}27.$$

Diese möglichen zwölf verschiedenen Farbdifferenzspannungen sind als Farbbalkenspannungen in der nachfolgenden Tabelle zusammengefaßt. Die Reihenfolge wurde so vorgenommen, daß, genauso wie im Abschnitt XII. 1. bei den Primär- und Komplementärfarben, sich eine treppenförmig ansteigende Leuchtdichteamplitude ergibt.

Farbbalken-spannungen	Amplituden der Primärfarben			Leucht-dichte	Farbartsignal	
	U_R	U_G	U_B	U_Y	Amplitude U_F	Phase φ
$-(U_B - U_Y)'$	0,84	1,0	0	0,84	± 0,41	180°
$(U_G - U_Y)' \mid 90°$	1,0	0,73	0	0,73	± 0,43	147°
$-U_Q$	0,46	1,0	0	0,73	± 0,43	213°
$-(U_R - U_Y)'$	0	1,0	0,66	0,66	± 0,58	270°
$(U_G - U_Y)'$	0,09	1,0	0	0,62	± 0,55	237°
U_I	1,0	0,41	0	0,54	± 0,49	123°
$-U_I$	0	0,59	1,0	0,46	± 0,49	303°
$-(U_G - U_Y)'$	0,91	0	1,0	0,38	± 0,55	57°
$(U_R - U_Y)'$	1,0	0	0,34	0,34	± 0,58	90°
U_Q	0,54	0	1,0	0,27	± 0,43	33°
$-(U_G - U_Y)' \mid 90°$	0	0,27	1,0	0,27	± 0,43	327°
$(U_B - U_Y)'$	0,16	0	1,0	0,16	± 0,41	0°

Trägt man diese sechs Paare der Farbdifferenzspannungen zusammen in einem Vektordiagramm ein, so ergibt das die Form der Abb. XII. 2. 13. Verbindet man die gestrichelt eingezeichneten Primär- und Komplementärfarben, so stellt diese Verbindungslinie gleichzeitig die Begrenzung für die Amplitude der Farbdifferenzspannungen dar. Werden diese Farbdifferenzspannungen mit ihren Leuchtdichteamplituden und dem dazugehörigen

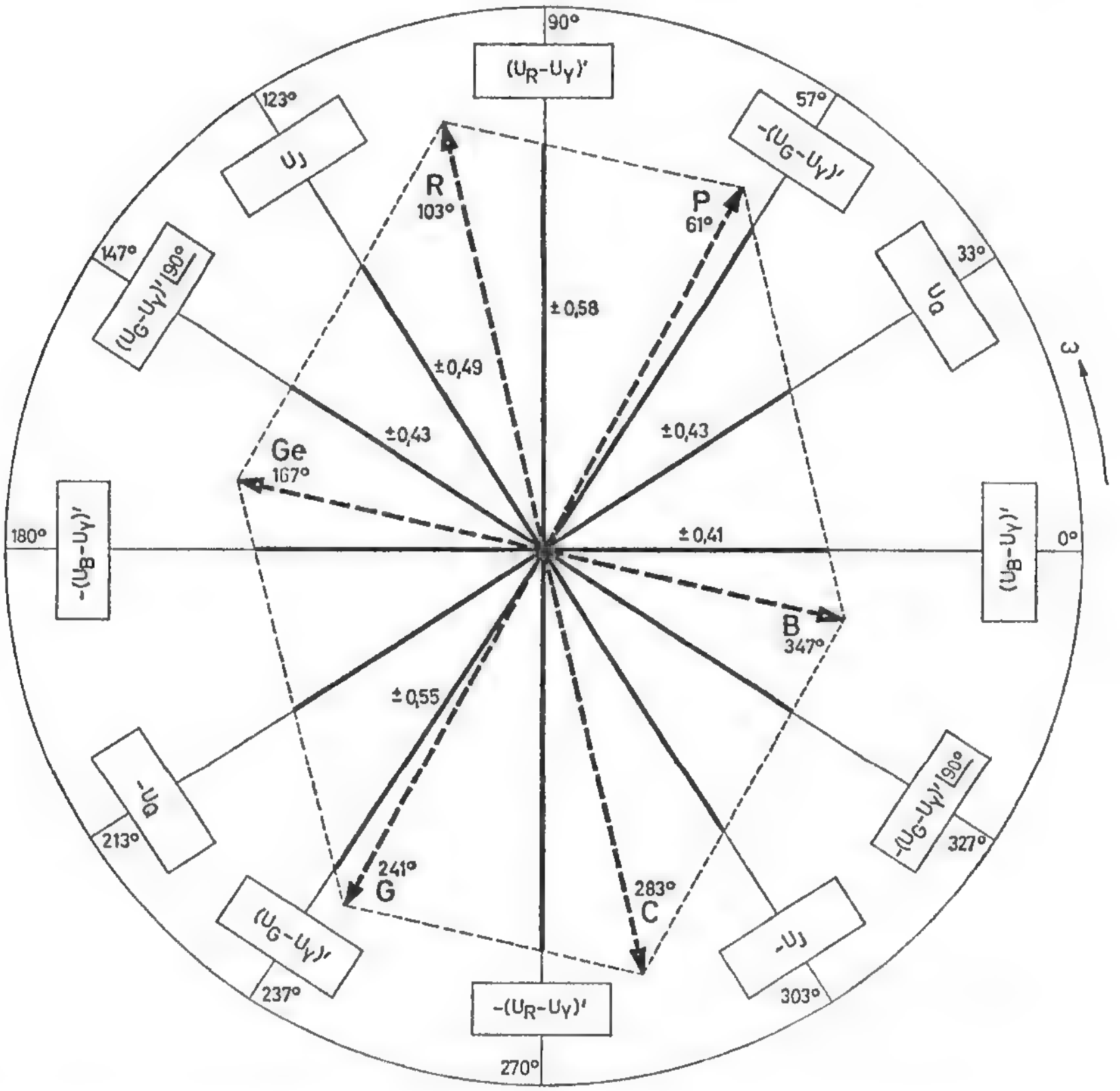


Abb. XII. 2. 13. Amplituden und Vektorlagen der Farbdifferenzsignale für die Erzeugung von Farbbalkenspannungen.

Farbartsignal über eine Zeilenperiode als Modulationsspannung eingetragen, so ergibt das den in Abb. XII. 2. 14. eingezeichneten Verlauf.

In welcher Reihenfolge derartige Farbbalkenspannungen für Testzwecke in Farbbalkengeneratoren zusammengeschaltet werden, hängt primär von dem gewählten Aufbau der Generatoren ab. Grundsätzlich könnte man statt der Anordnung mit treppenförmig ansteigender Leuchtdichtespannung auch den Phasenwinkel für die Reihenfolge der Farbspannung heranziehen und die Farbbalken nach steigenden Phasenwinkeln aufbauen. Hierbei ergibt sich die interessante Tatsache, daß, bis auf eine positive bzw. negative Abweichung von 3°, die Farbbalkenspannungen um jeweils 30° gegeneinander versetzt sind.

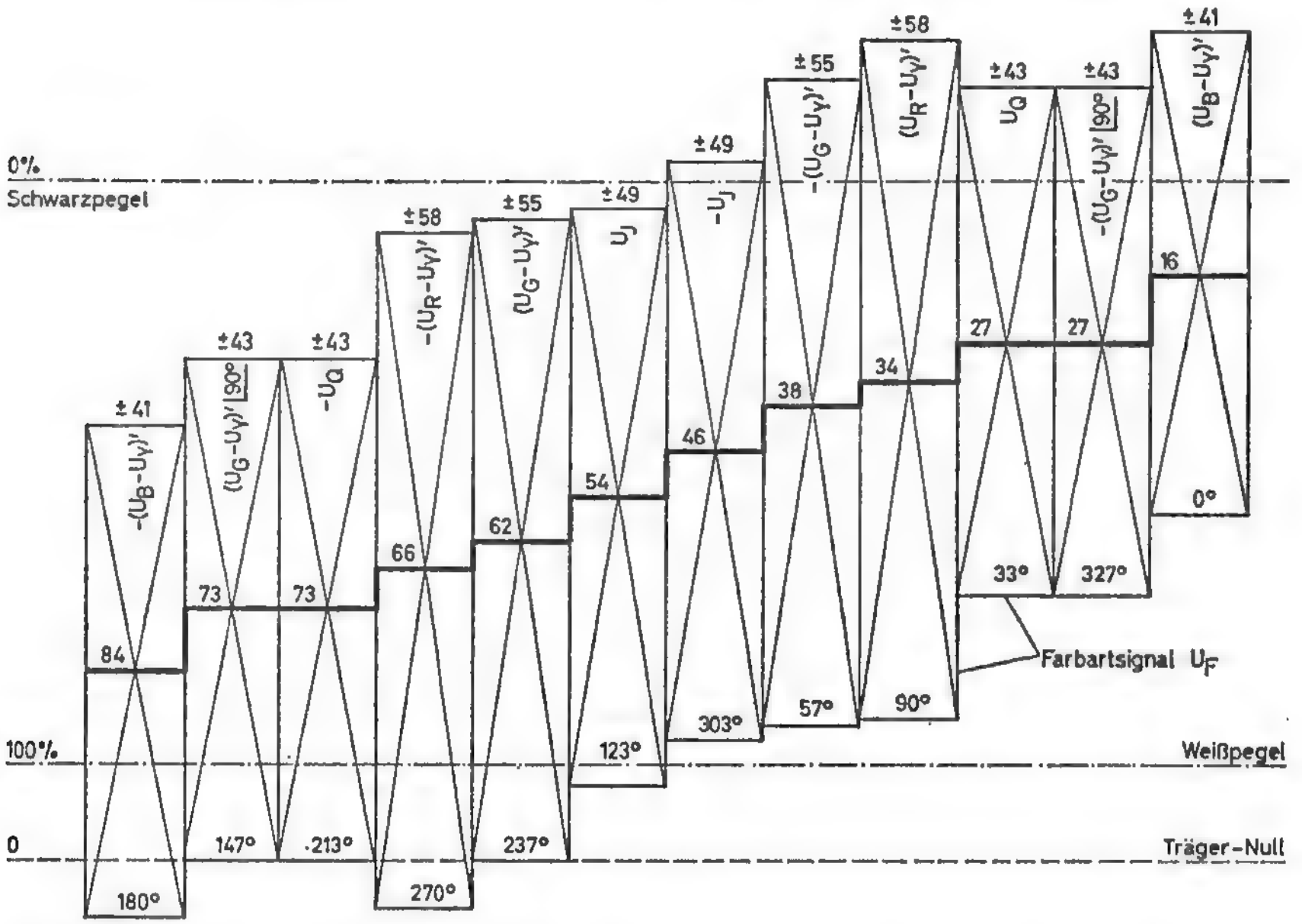


Abb. XII. 2. 14. Farbbalkenspannungen mit treppenförmig ansteigender Leuchtdichte.

Zusammenfassung

Am einfachsten lassen sich Farbbalkenspannungen aus den Primär- und Komplementärfarben aufbauen. Ergänzt durch einen weißen und schwarzen Balken kann man hieraus insgesamt 8 Farbbalkenspannungen gewinnen, die, über eine Zeilenperiode verteilt, auf dem Bildschirm ein Testmuster von 8 senkrechten Farbbalken erzeugen. Die Reihenfolge der Farbbalken kann dabei so vorgenommen werden, daß eine treppenförmig ansteigende Leuchtdichte erhalten wird. Da es für verschiedene Einstellungen von Nutzen ist, Farbbalkenspannungen als Farbdifferenzsignale zur Verfügung zu haben, wird auch der Aufbau dieser Farbbalkenspannungen im Einzelnen erläutert.

Insgesamt kann man 12 verschiedene Farbbalkenspannungen aus diesen Farbdifferenzsignalen ableiten. Es gibt hierbei jeweils zwei Farbmodulationsachspaare, die rechtwinklig zueinander stehen und aus den Modulationsspannungen $(U_B - U_Y)'$ und $(U_R - U_Y)'$ U_I und U_Q sowie $(U_G - U_Y)'$ und $(U_G - U_Y)' \mid 90°$ bestehen.

Die Farbmodulationspannung $(U_G - U_Y)' \mid 90°$ stellt dabei eine Rechenhilfsgröße dar, die für die Festlegung der $(U_G - U_Y)'$-Farbbalkenspannung benötigt wird.

LITERATURVERZEICHNIS

J. BERGMANS, *Kleine Farbenlehre,* Philips Technische Bibliothek, Eindhoven.

A. F. BOSCIA, *Color-Bar Generator produces I-Q Signals,* Electronics, Juni 1954, Seite 143.

P. J. BOUMA, *Farbe und Farbwahrnehmung,* Philips Technische Bibliothek, Eindhoven.

P. S. CARNT, G. B. TOWNSEND, *Colour Television,* Iliffe Books LTD, London.

G. COLDEWEY, *Kurze Darstellung der zusätzlichen Forderungen an Schwarz-Weiß-Fernsehsendern bei der Übertragung von farbigen Bildern,* NTZ 1960, Heft 4, Seite 175—178.

M. C. FRENCH, *A Sub-carrier Regenerator Circuit for Colour Television Receivers,* Journal Brit. I.R.E. Jan. 1963, Seite 83—95.

H. HOPF, *Untersuchungen zum Betrieb von Fernsehsendern mit Präzisions-offset der Trägerfrequenzen,* Rundfunktechnische Mitteilungen 1958, Seite 265—276.

F. JAESCHKE, *Ein NTSC - Farbmodulator für die CCIR-Norm,* A.E.Ü. Band **12** (1958), Heft 6, Seite 271—288.

F. JAESCHKE, *Zur Dimensionierung des Farbträgers in einem europäischen Farbfernsehsystem nach dem NTSC - Verfahren,* NWDR-Hausmitteilungen Jahrgang **7**/1955, Seite 224—228.

F. JAESCHKE, *Zur Schaltungstechnik von Demodulatoren für Farbfernsehsignale nach dem NTSC-Verfahren,* A.E.Ü. Band **15** (1961), Heft 4, Seite 187—199.

J. MÖBIUS, *Ablenkprobleme eines Farbfernseh-Empfängers mit einer Dreifarben-Maskenröhre,* Nachrichtentechnik - **10**/1960, Heft **12**, Seite 546—550.

J. MÜLLER, F. JAESCHKE, *Präzisions-Offset für den Farbhilfsträger im NTSC - System,* Elektronische Rundschau Heft **6**/1961, Seite 249—252.

P. NEIDHARDT, *Farbfernseh-Bildwiedergabe mit der „Bananen" - Röhre,* Elektronische Rundschau Nr. 2/1962, Seite 61—64, Nr. 3/1962, Seite 118—124.

P. NEIDHARDT, *Über den Farbabgleich einer Farbfernsehübertragungskette,* Radio und Fernsehen 4/1962, Seite 99—104.

N. PUDOLLEK, *Farbübertragung mit unterschiedlichen Bandbreiten,* Radio und Fernsehen 4/1962, Seite 111—116.

P. SCHAGEN, *THE BANANA - TUBE DISPLAY SYSTEM,* The Institude of Electrical Engineers 1961, Vol. **108**, Part B, No. 42.

T. TAUB, *Matrixing and Encoding Color for Telecasting,* Electronics, November 1955, Seite 140—145.

J. W. WENTWORTH, *Color Television Engineering,* Mc Graw - Hill Book Company, Inc.

COLOR TELEVISION HOME STUDY COURSE
RCA INSTITUTES INC, 1954.

Lehrbuch der drahtlosen Nachrichtentechnik.

Fernsehtechnik, Erster Teil, Seite 61—74, Seite 668—682.

Fernsehtechnik, Zweiter Teil, Seite 421—427, Seite 473—502.

STICHWORTVERZEICHNIS

	Seite
Abbildungsfehler	132
Abbildungsverzeichnung	135
Amplitudenmodulation	71
Apple-Tube	125
Augenempfindlichkeit	51
Banana-Tube	118
Bildträgermodulation	36, 38
Burst	90
Chromatron-Röhre	114
Differenzierglieder	147
Doppel-Gegentaktmodulatoren	85
Dreifarben-Theorie	6
Eichreize	12
Elektronenstrahlwobbelung	117
Farbartgleichrichter	105
Farbartmodulation	85
Farbartmodulationsvektor	165
Farbartverstärker	106
Farbartsignal	39, 43
Farbbalkenmuster	198
Farbbalkenspannung	197, 200
Farbdifferenzsignale	39
Farbdifferenzspannung	49, 95, 176
Farbdreieck	16
Farbempfindung	5
Farbenpaar	9
Farbempfängerstufen	100
Farbgitter	114
Farbkreis	9
Farbmischung	9
Farbmischkurven	23
Farbreinheitsmagnet	124
Farbstreifen	114
Farbton	17
Farbträgerfrequenz	61
Farbträger-Synchronsignal	90
Farbträgerschwingung	193
Farbtripel	112, 120, 128, 138,
Farbunterschiedsmerkmale	50
Frequenzverkämmung	63
Führungsstrahl	118
Grundfarben	11
Halbzeilen-Offset	61
Helligkeitsempfindung	4, 5
Hyperbolspiegel	118
I - Achse	53
Index-Röhren	117
Index-Streifen	117
Integration	152
Intensitätsunterschiede	127
Interferenzstörungen	31, 60
Kissenverzeichnung	132
Kompatibilität	27
Komplementärfarben	9
Konvergenz	123
Konvergenzfehler	136
Konvergenzmagnetfeld	135
Konvergenzpunkt	129
Konvergenzregelung	123
Konvergenzschaltung	146
Konvergenzspuleneinheit	123, 128
Korrekturströme	146
Laufzeit	104
Lawrence-Röhre	114
Leuchtdichte	17, 19
Leuchtdichtesignal	35, 95
Lochmaske	112, 120
Lochmaskenröhre	112, 120
Matrixeinheit	41
Matrixschaltung	175
Mischfarben	9
Mischkurven	13
Mischröhrenschaltung	160
Modulationsachsen	53, 91
Modulationsprodukt	75, 155
Modulationsschema	46
Netzhaut	4
Normalfarbdreieck	12
Normalfarbreize	13
Parabelstrom	139
Phasendiskriminator	185, 191
Phasensprung	75, 83, 95
Potentialsteuerung	117
Präzisions-Offsetverfahren	66
Projektionsröhren	114

	Seite
Primärfarben	16
Purpurfarbe	9
Purpurlinie	15
Q - Achse	53
Quarzoszillatorschaltung	185
Rasterverzeichnung	135
Reaktanzröhrenschaltung	185
Reaktanzstufe	188
Regelschaltung	192
Regenbogenfarben	2
Rückkopplungsbedingung	188
Sägezahnstrom	139
Sättigung	17
Sättigungsgrad	18
Sehpurpur	4
Seitenbänder	74
Sekundär-Emissionsstreifen	118
Siebglied	194
Sonnenlicht	1
Spektralbereich	2
Spektralfarben	2
Spektralfarbenzug	14
Stäbchen	4
Sulfidleuchtstoffe	127
Synchrongleichrichter	153
Tiefpaß	194
Trapezverzeichnung	136
Trägerschwingung	155
Ubermodulation	44
Verzeichnungsfehler	132
Verzögerungsleitung	104
Weißgerade	11
Weißpunkt	16
Zäpfchen	4
Zebra-Tube	117
Zweidiodenschaltung	157
Zylinderlinse	119

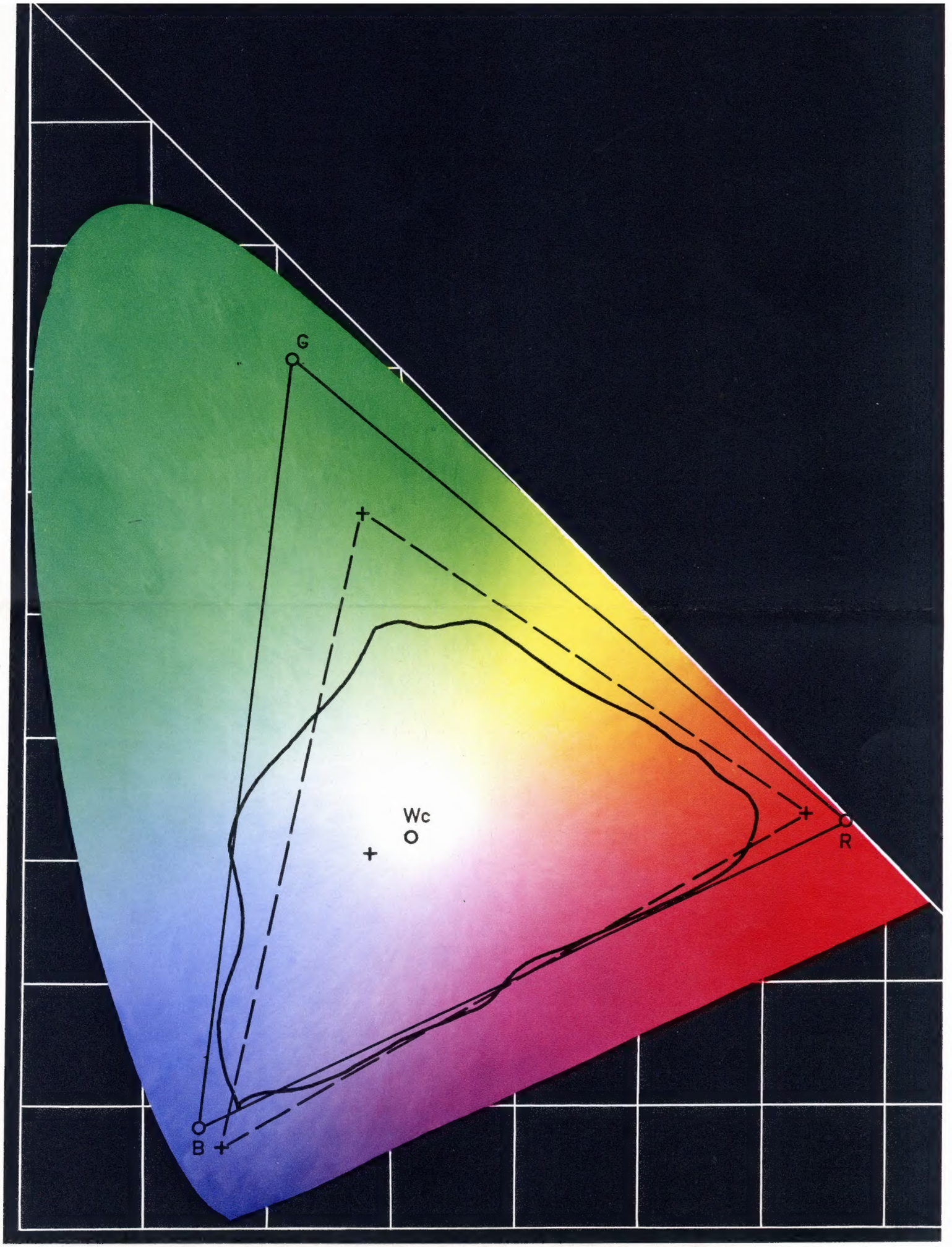


Abb. I. 4. 7. Farbverteilung in der Farbfläche zwischen Spektralfarbenzug und Purpurlinie. Die ausgezogenen Verbindungen geben das von den drei Primärfarben gebildete Farbdreieck wieder, während gestrichelt die Farbwiedergabe über drei Sulfide als Leuchtstoff einer Bildröhre eingetragen ist. Der Kurvenzug umschließt den größten Teil aller in der Natur vorkommenden Farben.